

확장된 네이보어-제르니케 방법에 의한 광픽업의 파면수차 복원 알고리즘

Aberration Retrieval Algorithm of Optical Pickups Using the Extended Nijboer-Zernike Approach

전재철*, 정기수**, 이건기***

Jae-Chul Jun*, Ki-Soo Chung**, Gun-Kee Lee***

요약

확장된 네이보어-제르니케 방법을 이용하여 광학계의 동공함수(pupil function)를 추산하는 알고리즘을 제안한다. 동공함수로부터 광학계가 가진 파면수차를 복원하고 아울러 동공에 비추어지는 빛의 밝기분포를 분석할 수 있다. 이 방법은 블루-레이 광픽업의 생산현장에 적용하여 실시간으로 광학계의 수차를 복원할 수 있다. 아울러 이 방법이 여러 다른 광학계에 널리 이용될 수 있음을 다양하게 수차를 부여해서 생성한 데이터를 분석하여 검증하였다.

초점영역의 빔 데이터로부터 동공함수를 얻는 역변환의 여러 방법 중에서 수차이론에 근거한 기존의 네이보어-제르니케 방법을 최근에 네덜란드 연구진이 개량한 확장된 네이보어-제르니케(extended Nijboer-Zernike: ENZ) 방법을 제안하였다. ENZ 방법은 초점영역의 3차원 빔 데이터로부터 해석적인 접근을 통하여 동공의 제르니케 계수를 효율적으로 계산해 낸다. 그러나 이 방법에서는 개구수(NA)가 큰 경우에는 근사적인 접근을 하도록 되어 있다. 본 연구에서는 보다 일반적인 상황에서 적용할 수 있는 수치해석 알고리즘을 개발하고, 이를 GUI 환경에서 운용할 수 있는 윈도우 기반의 프로그램을 작성하여 생성한 빔 데이터에 적용하여 이 알고리즘의 유효성을 검증하여 13개의 복소 수차인자 β_m^n 이 모든 요소가 0.7까지 분석을 하였고, 아울러 광픽업의 3D 빔 데이터를 실측해서 간접계로 측정된 데이터와 $R=0.98$ 정도의 상관관계를 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

In this work, the method of acquiring the pupil function of optical system is proposed. The wavefront aberration and the intensity distribution of pupil can be analysed with the pupil function. This system can be adopted to the manufacturing line of optical pickup directly and also has good performance to analysing various property of optical instrument. It is one kind of inverse problem to get pupil functions by 3D beam data. The extended Nijboer-Zernike(ENZ) approach recently proposed by Netherlands research group is adopted to accompany to solve these inverse problem. The ENZ approach is one of a aberration retrieval method for which numerous approaches are available. But this approach is new in the sense that it use the highly efficient representation of pupil functions by means of their Zernike coefficients. These coefficients are estimated by using matching procedure in the focal region the theoretical 3D intensity distribution and measured 3D intensity distribution. The algorithm that can be applied more general circumstance such as high-numerical aperture instrument is developed by modifying original ENZ approach. By these scheme, MS windows based GUI program is developed and the good performance is verified with generated 3D beam data.

Keywords : aberration retrieval method, optical disk, Blu-ray disk, Nijboer-Zernike approach

1. 서론

망원경이나 현미경 등 결상광학계는 각종 수차가 개입되어 명확한 상을 맺는데 장애로 작용한다. 기본적으로

로 수차를 모두 제거하기는 불가능하기 때문에 그 광학계를 이용하는 조건에서 수차를 최소화시키는 설계가 필요하고, 제작된 광학계가 최종적으로 가지는 수차를 보정하는 절차도 필요해진다. 한편 광저장장치의 광픽업, 레이저 리소그래피(lithography) 등 레이저가 좁은 영역에 집속되어야 하는 경우, 빔의 집속이 이상적인 기준에서 벗어난 정도 또한 수차이다. 따라서 어떠한 광학계이든지 이의 수차를 검증하고, 수차를 최소화시키도록 설계하거나 제조공정을 설계하는 것은 광학기구의 생산에서 아주 중요한 일이다.

* 한국소니전자 **경상대학교 **경상대학교(교신저자)

투고 일자 : 2009. 3. 18 수정완료일자 : 2010. 1. 28

계재확정일자 : 2010. 1. 29

수차는 물체가 놓여있는 상황, 즉 광학계에 입사하는 빛의 성격에 따라 여러 가지로 계열화 시켜 나타낼 수 있는데 대표적으로 구면수차, 코마, 비점이 있다. 광학계에 개입되어 있는 수차는 광선의 관점으로는 한 점에 집중되지 않는 것을 말하지만 파면의 관점으로는 구면에서 벗어난 정도를 말한다. 회절효과를 무시할 수 없는 보다 일반적인 상황에서는 수차의 정도를 파면의 왜곡으로 나타내는 파면수차가 보다 유용한 개념이 된다.

파면수차를 측정하는 일은 파동의 파면을 측정하는 일이므로 기본적으로는 간섭계를 이용해야 한다. 이를 위한 것으로 마하-젠더 간섭계나 다른 형태의 간섭계, 또는 최근에 널리 이용되고 있는 미소렌즈배열로 된 Shack-Hartmann 센서(Shack-Hartmann sensor)가 있다. 간섭계는 측정하려는 빛을 거울이나 광속분리기로 분리해서 서로 다른 광경로를 거치게 한 후 다시 만날 때 나타나는 간섭무늬를 관측하는 구조로 되어 있는 정교한 장치로서 측정된 간섭무늬의 형태로부터 파면수차를 다시 복원해 내게 된다. 그러나 간섭계는 정교한 장치로 고가일 뿐만 아니라 안정된 동작을 요하기 때문에 광픽업 등의 생산현장에 적용하기는 곤란하다.

수차를 포함하고 있는 빛이 이후에 어떻게 진행하는지는 회절이론으로 설명이 가능하다. 따라서 진행하는 빛의 회절결과로 수차를 산출하는 것은 일종의 역변환이다. 그러나 CCD 등으로 회절된 빛의 밝기 정보만을 측정하는 경우에는 위상 정보가 망실되므로 회절상으로부터 파면수차를 역산한다는 것은 근본적으로는 불가능하다. 1930년대 Zernike는 각종 수차를 체계적으로 기술할 수 있는 제르니케 함수를 도입하여 초점면에서의 회절상을 계열화시켜 산출하게 하는 수차회절이론을 발전시켰고, 이를 통해서 회절상으로부터 파면수차를 산출할 수 있는 기법이 Nijboer 등 네덜란드의 후속 연구진들에 의해 지속적으로 개발되어 왔다. 이것이 확장된 네이보어-제르니케(Extended Nijboer-Zernike: ENZ)방법이다. 이는 결상이 일어나는 초점면을 벗어난 주변의 빔의 회절상을 총체적으로 이용하여 출사동공면(exit pupil)에서의 파면과 광량, 즉 총체적인 빛의 파동량을 추정해 내고, 이로부터 파면수차를 복원하는 것이다.

본 연구는 빔의 3차원 영상으로부터 파면수차를 추정하는 알고리즘을 개발한 것이다. 이를 위하여 ENZ 방법을 채용하되 원래의 ENZ 방법이 가지고 있는 몇 가지 제약을 극복하고 또한 보다 빠르게 결과를 산출할 수 있는 최적화된 수치해석의 기법을 도입하였다. ENZ 방법은 NA가 커질 때에는 근사식으로 표현하는데 본 연구에서 개발한 알고리즘은 근사식을 이용하지 않고 적분함수 등을 빠르게 산출할 수 있는 수치해석 기법을 동원해서 영상의 측정과 수차의 복원에 소요되는 시간을 10여 초 이내로 하였다. 이는 광픽업의 생산 라인에 적용할 수 있는 충분한 속도가 된다. 광픽업에서는 CD의 적외선, DVD의 적색, Blu-Ray Disk(BD)의 청색을 내는 반도체 레이저에서 나온 빔이 프리즘, 각종 렌즈, 편광판 등의 여러 광학기구를 거쳐서 최

종적으로 디스크의 표면에 집속되어 작은 원판 형태로 비추어지게 되는데 그 과정에서 각종 수차가 개입되어 신호를 기록하거나 재생하는 성능을 저하시킨다. 따라서 이들 수차를 최소화할 수 있도록 중간단계의 각종 광학기구들을 정렬하거나 교체하는 것이 픽업의 제조공정에서 중요한 절차가 된다.

II. 수차회절이론과 ENZ 방법

2.1 수차회절이론

한 점에서 나온 빛이 렌즈를 거쳐서 한 점에 모이는 상황은 광선이 광축과 크게 기울어지지 않고 렌즈의 중심에서 크게 벗어나지 않은 상황, 즉 근축광선의 조건을 만족할 때뿐이다. 따라서 이러한 조건을 벗어난 경우에는 영상이 물체의 모양을 제대로 반영하지 못하는데 이것을 총체적으로 수차라고 한다. 수차는 이러한 결상계에서 뿐만 아니라 빛을 다루는 모든 광학기구에서 장애로 작용해서 이를 제거하거나 최소한으로 줄이는 것이 관건이 된다. 빛의 전파를 광선으로 다루는 초기의 기하광학의 수차는 파동광학의 관점에서는 파면의 왜곡을 뜻하게 되어 이를 파면수차(wavefront aberration)로 보다 일반화 시켜서 다루게 된다. 기하광학이 빛의 행동을 설명하는 근사적인 양식에 불과하고 보다 엄밀한 이론체계는 빛을 파동의 측면에서 해석하는 것이기 때문이다. 특히 광픽업은 레이저의 회절한계에서 작동하기 때문에 회절특성을 같이 설명할 수 있는 파면수차에 대한 이해가 필수적이다.

파면은 파동의 위상이 동일한 영역을 말하는 것으로 3차원의 파동은 보통 2차원의 곡면을 이루게 된다[?]. 이상적인 볼록렌즈에 의해 집속되는 파동은 파면이 초점을 중심으로 하는 구면인 구면파이다. 비록 파면에는 파동의 진폭의 정보를 가지지 않기 때문에 광선과 마찬가지로 파동의 전모를 묘사 하는데 부족함이 있다고 하더라도 파면 전체에 걸쳐서 거의 균일한 진폭을 하고 있는 광학계에서는 광선의 전파 양식으로 이해하는 것 보다는 더 근본적인 설명을 할 수 있다. 호이겐스 원리에 의해 파면이 전파되고, 이로부터 광학계가 가지는 회절의 효과를 반영할 수 있기 때문에 수차를 파면수차의 관점에서 이해하는 것이 보다 근본적인 접근법인 것이다.

픽업에서와 같이 레이저에서 나온 평행광선이 대물렌즈에 의해 집속되어 그 초점에 한 점으로 모여드는 상황은 파면의 관점으로는 다음과 같이 기술할 수 있을 것이다. 평면파가 볼록렌즈에 의해 초점을 향하는 구면파로 바뀌고, 초점면에서 렌즈의 동공, 즉 원판에 대한 회절상을 초점에 형성한다. 따라서 이 경우 파면수차는 최종적으로 구면파의 파면에서 벗어난 정도를 위상으로 해서 나타낼 수 있다. 이는 원형의 동공 각 지점에서의 위상의 변화값이 되어 $\Phi(\rho, \theta)$ 처럼 동공의 함수로 표현된다. 여기서 (ρ, θ) 는 동공의 위치를 나타내는 좌표로 ρ 는 1로 규격화한 동경 좌표, θ 는 방위각이다. 이렇게 파면수차는 픽업의 대물렌즈 이전에 레이저에서나 그 중간의 광학부품에 의해 평면

파에서 벗어난 효과까지 같이 가미되므로 수차에 대한 총체적인 기술이 될 수 있어서 여러모로 편리하다.

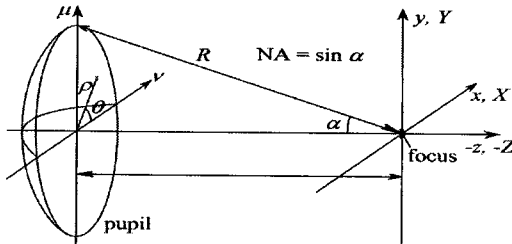


그림 1. 출사동공으로부터 상평면으로 향하는 광파의 좌표계.

Fig. 1. Geometry of the wave propagating from the exit pupil toward the image plane.

이제 동공의 파면수차를 위상과 아울러 진폭 $A(\rho, \theta)$ 를 같이 표현해서 다음과 같이 동공함수를 보다 일반적으로 나타내자.

$$P(\rho, \theta) = A(\rho, \theta) e^{i\Phi(\rho, \theta)}$$

$$= \sum_{n,m} [\beta_n^m R_n^m(\rho) \cos m\theta + \beta'_n R_n^m(\rho) \sin m\theta] \quad (1)$$

여기서 반경방향 함수 $R_n^m(\rho)$ 는 제르니케 다항식이고, \cos 과 \sin 부분의 방위각의 함수를 조합해서 제르니케 함수(Zernike function)가 된다. 제르니케 함수는 반경 1인 원판에서 정의되는 직교규격화된 함수집합으로 임의의 함수를 이들의 적절한 조합으로 나타낼 수 있다. 진폭함수 $A(\rho, \theta)$ 는 동공에 비추어지는 진폭으로 결상계의 경우에는 거의 상수로 수차와 무관하나 광픽업의 경우 대물렌즈에 비추어지는 빛이 가우스 빔의 형태를 하고 있어 이 값이 상수가 아니다. 따라서 본 연구에서는 이를 총체적으로 반영한 동공함수 $P(\rho, \theta)$ 로부터 수차를 해석하게 된다. 이때 전통적인 파면수차는 오직 $\Phi(\rho, \theta)$ 에서 추출될 것이다. 수차가 없는 경우는 $P(\rho, \theta)$ 가 (ρ, θ) 에 무관하므로 β_0^0 항만 존재한다. 따라서 이를 1로 두면 나머지 β_n^m 이 적절하게 각종 수차의 수차를 대변하게 된다.

동공함수로 주어지는 빛이 동공을 벗어나서 초점면 주위에 도달한 결과는 수차회절이론에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$U(r, \phi; f) = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} P(\rho, \theta) e^{if\rho^2} \cdot e^{2\pi i \rho r \cos(\theta-\phi)} \cdot d\theta \rho d\rho \quad (2)$$

여기서 $(r, \phi; f)$ 은 상영역의 좌표를 척도 없는 좌표값으로 나타낸 것이다. 즉, 상영역의 실제 물리적인 좌표값을 그림 1처럼 (X, Y, Z) 로 나타낼 때,

$$x = X \frac{NA}{\lambda}, \quad y = Y \frac{NA}{\lambda}, \quad f = -\frac{2\pi}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - NA^2}) Z \quad (3)$$

이고, 광축에 수직인 평면의 좌표값 (x, y) 을 극좌표 (r, ϕ) 로 나타내었다. 단 식 (2)는 호이겐스-프레넬 회절이론에 입각

한 것이지만 회절되는 빛이 가지는 경사각에 의한 효과는 반영하지는 않은 것이다.

2.2 ENZ 방법

Zernike가 자신의 이름이 붙은 제르니케 함수를 만든 후 Nijboer는 출사동공에서의 복소파동량에 대한 초점면에서의 복소파동량의 대응관계를 잘 정리된 형태로 나타낼 수 있었다. 이 네이보어-제르니케 회절이론은 바로 초점이나 초점을 조금 벗어난 위치에서, 오직 출사동공의 진폭이 거의 일정하면서 파면수차가 수 라디안에 미치지 못하는 상황에서 만족할 만한 결과를 보인다.

그러나 지금의 레이저를 이용한 광학기구들은 극단적으로 1에 가까운 NA를 가지는 경우가 많고, 또한 레이저의 특성상 동공에서의 빛이 가우스 함수의 밝기 분포를 가지는 등 네이보어-제르니케 회절이론에서의 조건에서 크게 벗어나기 때문에 이 이론을 확장할 필요가 있었다. 이에 따라 Janssen을 비롯한 몇몇 네덜란드의 연구자들은 네이보어-제르니케 회절이론을 확장시켜서 고-NA, 고-수차 등에도 적용 가능한 보다 일반적인 이론을 세우고 이를 20여 편의 일련의 논문으로 발표하였다[?]. 또한 이 이론을 이용해서, 초점을 앞뒤로 벗어난 입체의 밝기 분포로부터 동공함수를 복원해 내는 효율적인 기법을 개발하였다. 이것이 ENZ 회절이론, 혹은 ENZ 방법이다. 이제 (2) 식은

$$U(r, \phi; f) = \sum_{n,m} 2i^m V_n^m(r, f) [\beta_n^m \cos m\phi + \beta'_n \sin m\phi] \quad (4)$$

여기서 ρ 에 대한 적분부분은 다음의 함수로 함축되게 표시한다.

$$V_n^m(r, f) \equiv \int_0^1 R_n^m(\rho) J_m(2\pi r \rho) \rho d\rho \quad (5)$$

이 함수는 초점벗어나기 효과(defocus effect)와 방사효과(radiometric effect)를 무시할 수 있다면 베셀함수의 무한한 합의 해석적인 함수로 정리된다. 그러나 NA가 큰 경우 $V_n^m(r, f)$ 함수는 더 이상 해석적으로 다룰 수 없다. ENZ 방법에서는 이러한 상황에서는 근사적으로 이를 해결하는 방안을 모색하였다.

III. 수차복원 수치해석 알고리즘

이제 NA값이 큰 경우에는 초점벗어나기 효과와 방사효과를 무시할 수 없는 상황을 고려한다. 따라서 두 효과를 반영하기 위해서는 회절식 (2)를 수정해야 한다. 초점좌표 f 를 포함하고 있는 항 $\exp[if\rho^2]$ 은 다음과 같이 초점벗어나기 효과를 반영해야 한다.

$$e^{if\rho^2} \Rightarrow \exp \left[if \frac{1 - (1 - NA^2 \rho^2)^{1/2}}{1 - (1 - NA^2)^{1/2}} \right] \quad (6)$$

또한 방사효과는 적분항에 $(1 - NA^2 \rho^2)^{-1/4}$ 를 곱해서 반영한다. 이렇게 수정하여 다시 $V_n^m(r, f)$ 함수를 나타내면,

$$V_n^m(r, f) = \int_0^1 (1 - NA^2 \rho^2)^{-1/4} \exp \left[i f \frac{1 - (1 - NA^2 \rho^2)^{1/2}}{1 - (1 - NA^2)^{1/2}} \right] \cdot R_n^m(\rho) J_m(2\pi r \rho) \rho d\rho \quad (7)$$

인데 이는 불행하게도 해석적으로 잘 정리되지 않는다. 이에 따라 기존의 ENZ 방법에서는 $V_n^m(r, f)$ 함수를 근사적으로 표현하고 이로부터 수차 복원을 수행하였다.

본 연구에서는 $V_n^m(r, f)$ 함수를 원형 그대로 사용하되, 오차를 없이 계산할 수 있는 방안을 개발하였다. NA 값이 정해진 후 각종 차수 (n, m)에 대한 함수를 컴퓨터로 미리 계산된 2차원 배열에 기록해서 이를 조회하는 방법이다. 이는 메모리를 버퍼를 활용하는 셈인데, 이로써 해석적인 함수로 처리하는 것보다 오히려 빠르게 값을 조회할 수 있게 된다. 계속되는 계산에서 언제나 직사각형의 격자로 주어지는 (r, f) 점에서의 $V_n^m(r, f)$ 값만 참조하기 때문에 이것과 일치된 격자에 대한 값을 배열로 기록해 두므로 샘플링에 따른 오차가 개입되지 않는다. 수차해석은 결국 컴퓨터로 수행하기 때문에 처리속도의 문제만 없다면 근사해를 이용하는 것보다 버퍼를 활용하는 이 방법이 보다 더 정확한 값을 얻을 수 있게 하는 것이다.

$U(r, \phi; f)$ 의 여러 항들 중에서 β_0^0 값이 다른 β 값들에 비해서 매우 크고 또한 다른 값들이 복소수인 것과 달리 오직 실수값만 가지고 있는 점에 유의해서 \sum 부분을 $n=m=0$ 의 부분 즉 β_0^0 와 그 외 항들을 분리해서 다음과 같이 표시하자.

$$U(r, \phi; f) = 2\beta_0^0 V_0^0(r, f) + 2 \sum'_{n,m} \beta_n^m i^m V_n^m(r, f) \cos m\phi + 2 \sum'_{n,m} \beta_n^m i^m V_n^m(r, f) \sin m\phi \quad (8)$$

여기서 \sum' 는 $n=m=0$ 를 제외한 것이다.

이제 실제로 측정되는 광량과 대비하기 위해서 이론적인 광량을 정리하면,

$$\begin{aligned} I(r, \phi; f) &= |U(r, \phi; f)|^2 \\ &= 4(\beta_0^0)^2 |V_0^0(r, f)|^2 \\ &+ \sum'_{n,m} \beta_0^0 [8\text{Re}(i^m V_n^m V_0^{0*})] [\text{Re}(\beta_n^m) \cos m\phi + \text{Re}(\beta_n^m) \sin m\phi] \\ &- \sum'_{n,m} \beta_0^0 [8\text{Im}(i^m V_n^m V_0^{0*})] [\text{Im}(\beta_n^m) \cos m\phi + \text{Im}(\beta_n^m) \sin m\phi] \\ &+ \text{higher order terms} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\cos m\phi$ 와 $\sin m\phi$ 에 대해 선형 부분과 고차항 부분으로 나눈 것이다. 고차항은 2차항까지 있는데 β 에 대해서 제곱에 의존하므로 수차가 적은 광학계에서는 이를 무시할 수 있다. 따라서 우선은 고차항을 무시할 수 있다는 전제하에 $I(r, \phi; f)$ 의 정보로부터 β 의 값들을 알아내도록 한다.

이때에는 $\cos m\phi, \sin m\phi$ 에 대한 선형만 나타나므로 푸리에 정리를 도입하여 이들의 계수를 추출하는 것이 가능해진다. 따라서 초점 전후로 취득한 3차원의 영상정보를 다음과 같이 $\cos m\phi$ 이나 $\sin m\phi$ 을 곱해서 평균을 취한 m 차 모멘트로부터 해석한다.

$$\Psi^m(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \phi; f) \cos m\phi d\phi \quad (10)$$

$$\Psi'^m(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \phi; f) \sin m\phi d\phi \quad (11)$$

이렇게 결정된 β_n^m 는 광량의 식 (9)에 오직 선형의 항만 있다고 가정한 것이다. 따라서 \cos 과 \sin 이 둘 곱해진 고차항들에 대한 보정을 해야 한다. 이 방법은 바로 이러한 형식의 수치해석에서 널리 이용되는 예측-보정법 (predictor-corrector method)인데, 우선 선형근사로 β 를 구하고, 이들 β 를 고차항에 대입해서 이에 대한 기여부분을 원래의 측정데이터에서 빼 준 것으로 측정데이터에 대한 보정데이터로 삼게 된다. 다시 보정데이터를 원래의 측정데이터로 삼아서 선형근사로 β 를 구한다. 이와 같은 절차를 순환해서 계속하게 되면 대부분의 경우 β 가 일정한 값으로 수렴하게 된다. 만일 수렴이 이루어졌다면 고차항이 다 반영된 이론식과 측정치가 일치하는 합당한 결과가 된 것이다.

그림 2는 3D 영상과 동공함수의 관계를 그린 것이다. 즉 동공함수 $P(\rho, \theta)$ 는 $I(r, \phi; f)$ 를 결정하며, 수차복원 알고리즘은 I 로부터 P 를 계산하는 역변환과정이다.

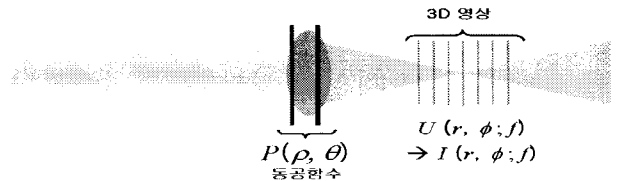


그림 2. 초점 주변에서 밝기에 대한 3D 영상을 얻기 위한 광학계의 배치.

Fig. 2. Optical layout for measuring 3D intensity distribution in the focal region.

IV. 수차복원 알고리즘과 프로그래밍

4.1 3D 빔의 측정

ENZ 방법에 의해 수차를 해석하기 위해서는 초점 주변 영역의 빔의 입체영상을 측정해야 한다. 특히 각종 수차에 대한 정교한 결과를 얻기 위해서는 영상의 측정영역이 넓어야 한다. 그러나 픽업의 구조상 현실적으로 이 영역이 제한될 수밖에 없다. 또한 영역이 크고, 해상도가 높아질수록 데이터 처리나 분석에 소요되는 시간이 커지므로 분석한 결과가 생산현장에서 유용한 최적의 측정영역을 확정해야 한다. 이에 따라 앞에서 서술한 수차해석법을 인위적으로 생성한 데이터에 대해 다양한 조건을 부여해서 모의실

험을 수행했고 이로부터 측정의 조건을 확정했다. 단 픽업의 생산 현장에서 보통 3차 수차까지 이용하나 본 연구에서는 개발단계이므로 이 범위를 넘어서서 5차 수차를 해석하는데 충분한 정도로 다음과 같은 조건을 설정할 수 있었다.

- 광축의 영역 : $-2\pi \leq f \leq 2\pi$, 초점면에 대해 대칭
- 광축의 수직면 : $r \leq \pi$ 인 원형
- f 방향의 샘플링 수 : 21
- r 방향의 샘플링 수 : 51
- θ 방향의 샘플링 수 : 180
- m 의 차수 : $m=0,1,2$
- n 의 차수 :
 - $n=0,2,4,6,8$ for $m=0$,
 - $n=1,3,5,7,9$ for $m=1$,
 - $n=2,4,6,8$ for $m=2$

θ 방향의 샘플링은 50 정도로 충분하나 이는 측정데이터에 대한 모멘트를 구하는 과정에서 미리 반영되어 수치해석의 과정에서 계산 속도에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 넉넉하게 한 값이다.

픽업을 통과한 빔을 현미경 구조의 확대경을 거쳐서 최종적으로 CCD 카메라를 통해 빔의 영상을 취득하게 된다. 이 때 CCD의 결상면에 대응되는 광학계의 물체면을 적절하게 이동시켜서 얻은 단면상을 연속적으로 누적시키면 입체상이 되는 것이다.

이제 CCD에 이르는 확대경의 배율과 CCD의 픽셀 크기 등의 조건을 위의 수치해석을 효과적으로 해 낼 수 있는 최적의 조건과 맞추어서 정해야 한다. 단 위의 조건들이 파장과 NA값에 무관한 척도로 되어 있기 때문에 실제 CD, DVD, BD 등 픽업의 종류에 따라 빔 측정계의 배율, 해상도, 픽셀의 크기 등이 달리 정해지게 된다.

그림 3은 광픽업의 최종 대물렌즈로부터 디스크의 신호면에서 집속되는 레이저 빔의 3D 영상을 취득하는 장치의 계통도이다. 왼쪽의 픽업에서 나오는 빔은 여러 단의 렌즈를 거치면서 확대되어 카메라의 CCD 면에 결상된다. 그림에서 중간의 카메라는 확대율이 작은 것으로 빔을 광학계의 중심에 배치하기 위한 것이고, 오른쪽의 카메라가 이보다 배율이 커서 중심 빔과 주변 빔을 화면에 채워서 3D 영상을 취득하는 것이다.

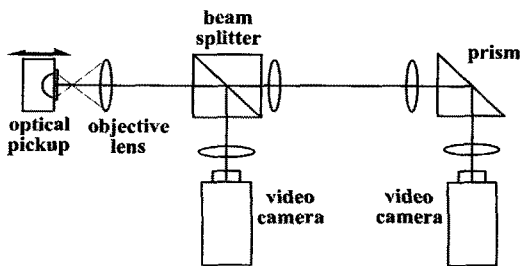


그림 3. 3D 빔을 측정하기 위한 광학배치.

Fig. 3. Optical configuration used to measure 3D beam of optical pickup.

4.2 측정 및 수치해석 프로그래밍

$V_n^m(r,f)$ 함수는 해석하려는 광픽업의 규격이 정해지고, 또한 해석에 포함시키는 3차원 빔의 영역과 샘플링 격자의 기준이 정해지게 되면 미리 정해진다. 최초실행 단계에서 이 함수를 계산해서 프로그램의 내부 변수로 기억해 두고 빠르게 함수값을 조회하게 한다. (r,f) 공간상에서 계산에 동원되는 지점은 2차원의 격자점으로 이미 정해져 있다. 이제 정해진 격자점에 대해 각각의 차수 (n,m) 에 대한 $V_n^m(r,f)$ 의 함수 값을 2차원 배열의 데이터로 기록하여 조회하게 한다. 4.1 절에서 설정한 조건대로라면 (r,f) 공간의 격자점은 51×21 의 규모이고, 또한 (n,m) 의 차수는 모두 14개이므로 배열로 다루는 것이 프로그램에 거의 부담을 주지 않는다. $V_n^m(r,f)$ 의 수치해석에서 필요한 고정된 함수들은 모두 배열값으로 메모리에 상주시켜서 마치 내장 함수처럼 빠른 계산을 가능하게 한다.

이렇게 동종의 픽업에 대한 사전처리를 거치게 되면 오직, 각각의 픽업에 대한 3차원 빔에 대한 측정데이터 만이 분석데이터로 달리 설정되는데 이때에도 전체 데이터가 필요한 것이 아니라 m 차 모멘트인 몇몇의 2차원 배열이 필요해진다.

프로그램은 Microsoft 사의 Visual Studio .NET 2008을 통해서 구현하였다. V_n^m 의 계산에 벡셀 함수가 필요하고, 또한 이 함수가 복소함수이므로 복소수의 연산이 필요하다. 아울러 행렬의 역행렬을 구해야 하므로 행렬연산도 필요하다. 이러한 필요한 요소들은 일부 공개된 라이브러리들을 참조하여 구현하였다. 단 체르니케 다항식 등 보편적이지 않는 특수함수는 직접 작성하였고, 속도가 느린 특수함수는 적절하게 버퍼를 가미하여 빠른 속도의 연산이 되도록 하였다.

한편 3D 빔의 형상에 대한 분석 결과는 모두 수치로 계산되지만 눈으로 이를 관찰해서, 특징과 패턴을 인지하는 것도 중요하다. 따라서 이를 위해 3D 입체상을 다양하게 화면에 나타낼 수 있고, 또한 이에 대한 임의의 단면을 보거나 하는 기능이 필요하다. 여기서는 많은 상업용 프로그램에서 채용하고 있는 VTK 라이브러리를 이용한다. VTK는 3D 컴퓨터 그래픽과 영상처리, 시각화를 위한 공개 소프트웨어로서 기본적으로 C++로 작성되어 있으나 다른 언어에서도 이용할 수 있도록 되어 있다. VTK는 빔의 측정에서나 분석에서 다 같이 이용한다.

그림 4는 분석 프로그램의 실행화면이다. 프로그램에서 측정된 빔 데이터를 넘겨받으면 설정한 상황에 맞추어 분석을 수행하고, 이 결과를 표시한다. 왼쪽 화면은 측정된 빔 데이터의 것이고, 오른쪽 화면은 분석한 β 값들로부터 생성시킨 빔 데이터의 것으로 둘을 비교해 볼 수 있다.

해석 프로그램은 m 과 n 의 차수를 다르게 설정할 수 있도록 하였고, 이들 차수를 점차 높여가며 프로그램의 수행을 검증해 보았다. 차수를 높이면 수차를 더욱 정교하게 산출해 낼 수 있지만 $V_n^m(r,f)$ 등 각종 함수의 배열의 크

기가 커지고, 행렬 계산의 차수도 높아진다. 뿐만 아니라 광량의 식에서 2차항에서 기여하는 항목수가 제곱으로 늘어나므로 예측-보정법에서 수렴하는데 소요되는 시간도 증가하게 된다.

검증 결과 $m=0\sim 11$ 의 범위에서 각각 12 단계의 n 값에 대해서 해석을 수행하는 것을 확인하였다. 이 수준이 거의 한계에 가까운 것으로 이를 초과하는 경우에는 실제의 픽업에 적용하면 결과가 수렴하지 않거나 합당한 결과를 얻을 수 없는 경우가 많았다. 그러나 $m=0\sim 6$ 와 7단계의 n 에서는 실제의 적용에 무리가 없을 정도로 빠른 속도를 유지한다. 참고로, n 과 m 의 차수를 높이는데 따른 다른 부정적인 효과가 확인되었는데 이는 제르니케 다항식의 ρ 에 대한 고차항이 동공의 가장자리에서 매우 민감하게 변하여 동공함수가 제대로 복원이 되지 않는 점이다.

측정과 분석의 일련의 과정으로 하나의 광픽업에 대해 측정과 분석을 하는데 약 10초 정도 소요되었다. 이 정도는 생산현장에 적용하는데 무리가 없는 속도이지만 측정과 분석의 과정을 보다 최적화를 시키면 이 시간을 수 초 정도로 단축할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 엄밀함을 기하기 위해 분석의 정밀도를 높게 유지하였고, 5차 수차까지 30여개의 수차값을 분석해 내도록 하였지만 실제의 생산 현장에서 적용하는 경우에는 ~1%의 정밀도와 10개 미만의 수차해석으로 충분하다.

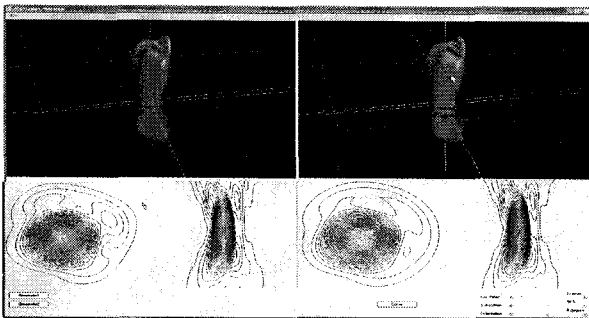


그림 4. 수차복원 프로그램의 실행화면

Fig. 4. Screen shot of the program which retrieve the optical aberration

V. 결 과

5.1 생성한 3D 빔의 수차 해석능력

ENZ 방법의 적합성과 수차해석 알고리즘을 프로그램으로 구현한 결과를 검증하기 위해 의도적으로 수차를 부여한 몇 가지 경우에 대해서 시뮬레이션을 실시하였다. 생성하는 데이터는 픽업의 DVD 광학계의 3차원의 빔에 대한 측정조건을 기준으로 삼되, 이보다는 좀 더 정교하게 하였다. 이는 모멘트 계산에서 다시 샘플링을 할 때 생기는 부정적인 양자화 효과를 완화하기 위한 것이다. 이에 따라 광축에 수직하게 형성하는 한 프레임은 600×600 으로 하고 이를 z 축을 이동시켜서 61 프레임을 구성하였다. 이로써

$600\times 600\times 61$ 의 격자점에 대한 복셀(voxel) 데이터가 형성된다. 또한 복셀의 피치는 $0.025\times 0.025\times 0.25\mu\text{m}^3$ 으로 하여 전체 취득 범위는 약 $15\times 15\times 15\mu\text{m}^3$ 이 된다. 이 규모는 영상에 대한 모멘트 계산에 이용하는 범위를 넘어서기 때문에 모멘트 계산에서 데이터가 부재하는 상황은 생기지 않는다.

이렇게 실제 측정환경과 일치시킨 조건에서 의도적으로 수차를 부여하고 복셀 데이터를 생성한다. 이때 초점벗어나기 효과와 방사효과를 반영한 회절식을 이용하였다. 따라서 이 회절 관계식으로 출발하여 수차를 해석해 내는 전 과정의 적합성을 검증할 수 있게 된다. 복셀 데이터로부터 미리 설정된 각각의 m 의 차수에 대해 \cos 과 \sin 의 m 차 모멘트를 구하여 분석에 이용하는 기본 데이터로 삼는다. 단 앞서 기술한 실측데이터의 분석에서의 조건보다 각 방향으로 약 2배로 정교하게 해서 다음과 같이 하였다.

- 광축의 영역 : $-4\pi \leq f \leq 4\pi$, 초점면에 대해 대칭
- 광축의 수직면 : $r \leq 2\pi$ 인 원형
- f 방향의 샘플링 수 : 41
- r 방향의 샘플링 수 : 101
- θ 방향의 샘플링 수 : 360

한편 여러 다른 β 값들을 부여해서 분석을 했고, 대체로 적절하게 분석하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서는 이 중에서 $\beta_0^0=1$ 로 두고, $\beta_2^0=0.2+0.3i$, $\beta_3^1=0.5+0.2i$ 의 값만 부여한 동공함수의 빔의 분석결과를 예로서 보인다.

그림 5는 생성한 빔의 모양과 이를 분석한 결과로부터 생성한 빔의 등고면을 나타내고 있다. 그림에서 위쪽이 빔이 진행되는 방향, 오른쪽이 x 축 방향이다. 모든 β 값을 0으로 두었기 때문에 \sin 항은 나타나지 않으므로 동공함수가 θ 에 대한 우함수이다. β_n^0 항들은 광축에 대해 대칭으로 기여하고, β_n^1 항은 $\cos\theta$ 항으로 하나의 극을 만드는데 그림을 통해서 x 축 방향으로 치우친 경향을 볼 수 있다. 한편 오른쪽의 분석한 결과와 비교해 보면 대체로 빔의 형상을 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

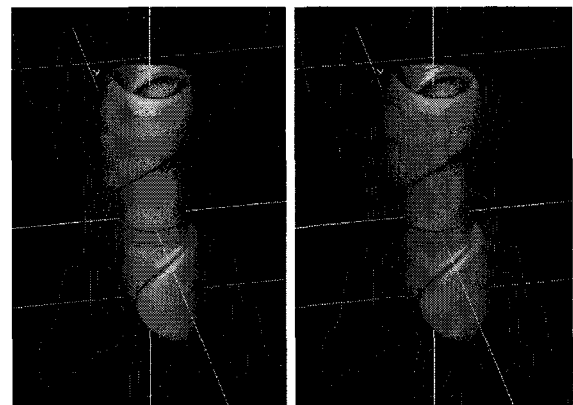


그림 5. 수차를 부여한 3D 빔과(왼쪽)과 이를 복원한(오른쪽) 등고면

Fig. 5. Isosurfaces created from 3D beam data generated with two aberration terms(left) and with its retrieved aberration coefficients (right).

표 1은 예측-보정법을 점차 진행함에 따라 β 값이 수렴하는 양상을 보여준다. 분석에 이용한 모든 차수를 나타내었으나 β 값, 즉 \sin 항의 계수는 처음부터 0.000의 정확한 값을 보이므로 나타내지 않았다. 이는 빔 데이터 자체가 θ 에 대한 우함수이고 따라서 \sin 에 대한 모멘트가 모두 0으로 이의 기여가 처음부터 나타나지 않기 때문이다.

예측-보정법을 계속 수행한 결과 약 15회에서 컴퓨터의 배정도 실수의 범위에서 일정한 값으로 수렴하며 계산에 걸리는 시간은 1회 당 약 1초로 약 10초가 소요되었다. 표에서 5회까지만 보인 것은 이 차수에서 소수점 이하 4자리의 유효자리수로 수렴하였기 때문에 실제의 측정에서는 이 정도로 충분하다고 판단되기 때문이다.

표 1. 예측-보정법을 거듭함에 따른 복원된 β_n^m 값.

Table 1. Successive values of retrieved β_n^m taken in the predictor-corrector procedure.

	선형	1회	3회	5회
β_2^0	0.126+0.294i	0.182+0.293i	0.189+0.297i	0.189+0.297i
β_4^0	-0.060-0.002i	-0.022+0.005i	-0.014-0.001i	-0.014-0.001i
β_6^0	-0.009-0.002i	0.001-0.001i	0.002-0.002i	0.002-0.002i
β_8^0	-0.020+0.002i	-0.005+0.001i	-0.002+0.001i	-0.001+0.002i
β_1^1	0.008-0.008i	-0.001-0.001i	-0.001-0.000i	-0.002-0.000i
β_3^1	0.462+0.228i	0.490+0.195i	0.495+0.199i	0.495+0.199i
β_5^1	-0.066+0.022i	-0.009+0.006i	-0.004-0.001i	-0.003-0.001i
β_7^1	0.018+0.001i	0.002+0.001i	-0.001-0.001i	-0.002-0.001i
β_9^1	-0.006+0.000i	0.004-0.004i	0.002+0.000i	0.001+0.000i
β_2^2	0.022+0.000i	0.001-0.002i	0.000-0.000i	0.000-0.000i
β_4^2	0.016+0.000i	0.004-0.005i	-0.000-0.000i	-0.000+0.000i
β_6^2	-0.023+0.000i	-0.001+0.001i	-0.001+0.000i	-0.000+0.000i
β_8^2	0.013+0.000i	-0.002+0.004i	0.000+0.000i	0.000+0.000i

표 1에서 각각의 계수를 살펴보면 0으로 준 β 값들도 얼마간의 값이 나타나고, 아울러 β_2^0, β_3^1 값도 원래의 설정값과 얼마간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 특히 β_2^1 이 β_4^1 등으로, β_3^1 이 β_5^1 등으로 같은 m 의 차수로 전파되는 경향이 뚜렷한데 이는 앞서 설명한 양자화 영향 때문이다. 즉, \cos 과 \sin 의 각 m 에 대한 모멘트를 계산할 때, 직육면체의 격자 형태로 주어진 복셀 값을 읽어야 하는데 모멘트 계산은 원통좌표계의 격자로 샘플링을 하게 되어 직교좌표계의 격자와 대응이 되지 않는다. 따라서 선형내삽으로 추정하는데, 이 과정에서 오차가 개입된다. 이는 빔의 격자를 보다 정교하게 하면 점차 설정값(참값)에 더 가까운 β 를 추정해 내는 것으로 확인할 수 있었다.

5.2 알고리즘의 검증

직교좌표의 격자에 대해 생성한 데이터는 비록 실제의 측정상황을 따르기는 하지만 양자화에 의한 오차가 개입되기 때문에 보다 객관적으로 본 연구에서 도입한 알고리즘을 검증할 필요가 있다. 이를 위해 빔의 모멘트 계산에 필

요한 데이터를 회절이론에서 직접 산출하도록 한다. 즉 모멘트 계산에 이용하는 격자에 대응되게 원통좌표의 격자에 대해 빔 데이터를 생성하고 분석하였다. 앞과 마찬가지로 $m=0$ 에 대해 $n=0,2,4,6,8$ 의 차수, $m=1$ 에 대해 $n=1,3,5,7,9$ 의 차수, $m=2$ 에 대해 $n=2,4,6,8$ 의 차수까지 β 값들을 적절하게 부여 하였다.

분석한 결과, β 의 요소가 단일성분일 경우에는 $|\beta| < 4$ 정도에서는 거의 일치되는 값을 나타내었다. 수차가 고도로 혼재된 상황에서의 예측-보정법의 성능을 평가하기 위해서 주어진 m 과 n 의 범위의 모든 β 의 실수값과 허수값을 동일하게 주어서 분석을 시도하였다. 실제로 이 요소는 모두 $\beta_0^m (=1.0)$ 을 제외한 13개의 β_n^m 이 각각 실수와 허수로 되어 있으므로 26개의 수차인자가 개입된 것이다. 이들 값을 0.1~1.0 범위로 해석했고 그 결과는 다음과 같다.

$\beta_n^m = 0.6 + 0.6i$ 의 경우까지는 합당한 결과를 계산했다. 그러나 $\beta_n^m = 0.7 + 0.7i$ 인 경우에는 예측-보정의 횟수를 거듭하면 계속해서 수렴하지는 않지만 그 속도가 매우 완만해서 1,000회에서도 약 0.2%의 오차값을 보인다. 또한 $\beta_n^m = 0.8 + 0.8i$ 이후에는 수렴을 잘하지 않거나 수렴하더라도 설정값과 어긋나는 결과를 나타낸다.

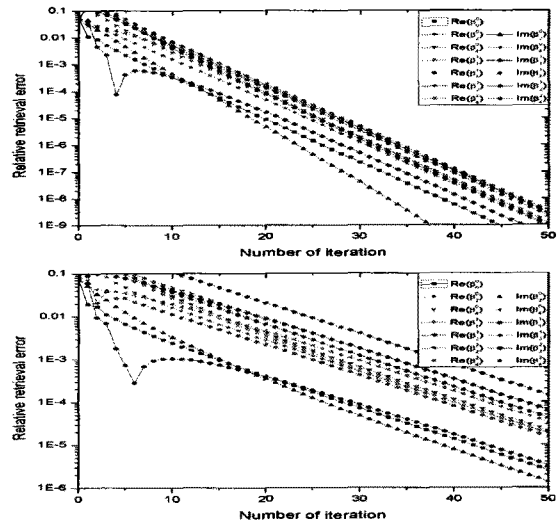


그림 6. 순환 횟수에 대한 각 β 값의 잔류 오차.

Fig. 6. Plots of the relative residual errors remaining in the retrieved β -values versus the number of iterative step.

그림 6은 $\beta_n^m = 0.5 + 0.5i$ (위 그림)와 $\beta_n^m = 0.6 + 0.6i$ (아래 그림)에 대해 예측-보정의 횟수에 대해 각 β 가 수렴하는 경향을 나타낸 그래프이다. 두 경우 모두 100회 이상에서 모든 β 값을 10자리 이상 정확하게 산출하였다. 그래프에서 그 세로축이 로그 눈금으로 되어 있으므로 각 순환마다 오차는 거의 동일한 비율로 감소하는 것을 알 수 있다. 실제로 26개의 성분이 0.6이라는 것은 수차가 매우 심한 상황이다. 뿐만 아니라 β 는 동공의 진폭의 불균일한 정도도 반영하므로 다양한 광원에 대해 적용하는 것도 무리가 없다. 이 결과로부터 총체적으로 본 연구에서 이용한 수차해석

알고리즘이 통상적인 광학계에 적용하는데 합당하다고 판단할 수 있다.

VI. 결 론

5.3 픽업의 수차해석능력

지금까지 서술한 수차분석을 실제의 BD 픽업에 적용하였다. 이 픽업은 CD, DVD, BD의 광학계가 같이 들어 있으며, 우선 DVD 부분과 BD 부분에 대한 3D 빔 측정을 수행하고 이의 수차 분석을 하였다. CD 부분을 제외한 것은 이 경우 광학계의 정밀도가 다른 둘에 비해 떨어지기 때문에 수차분석의 필요성을 크게 느끼지 못하기 때문이다. BD와 DVD 부분은 빔의 규모가 차이가 있기 때문에 빔의 상을 측정하는 광학계의 구성과 배율에 차이가 있다. 또한 프로그램은 한 조의 개구수(NA)와 파장에 대한 분석을 수행하게 작성하였으므로 두 종류의 광학계에 대해서는 동시에 분석할 수는 없다. 따라서 DVD와 BD 부분을 별도로 측정과 분석을 수행하였으며, 여기서는 DVD 부분에 대한 분석결과만 보인다. 픽업은 S사의 KEM-350으로서 DVD 부분은 $NA = 0.66$, $\lambda = 405 \text{ nm}$ 으로 측정 조건은 다음과 같다.

한 비디오카메라 전체 프레임 1024×768 에서 중심 부근에서 주요 빔에 대해 200×200 을 추출하고, 또한 z 축으로 이동시켜서 31 프레임을 구성하였다. 이로써 $200 \times 200 \times 31$ 의 격자점에 대한 복셀 데이터가 형성된다. 복셀의 피치는 약 $0.043 \times 0.043 \times 0.3 \mu\text{m}^3$ 으로 기본 데이터의 규모는 약 $8.6 \times 8.6 \times 9.0 \mu\text{m}^3$ 이다. 이에 대해 앞서처럼 $m=0$ 에 대해 $n=0, 2, 4, 6, 8$ 의 차수, $m=1$ 에 대해 $n=1, 3, 5, 7, 9$ 의 차수, $m=2$ 에 대해 $n=2, 4, 6, 8$ 의 차수까지 β 값들을 추정한다. 따라서 빔 데이터로부터 0, 1, 2차 모멘트까지 계산해서 이를 분석을 위한 최종 데이터로 삼게 된다.

표 2는 실험에 사용한 픽업 두 개에 대한 수차분석결과이다. 둘의 결과는 마하-젠더 간섭계로 측정된 결과와 $R=0.98$ 정도의 상관관계를 보이고 있어 고가의 간섭계를 대신하여 수차측정에 이용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

표 2. 두 픽업의 위상함수로부터 복원한 α 계수

Table 2. Set of α -coefficients describing the phase in the exit pupil of the two optical pickups.

α_n^m	aberration	pickup (a)		pickup (b)	
		cos	sin	cos	sin
α_2^0	defocus	0.0074	-	0.0974	-
α_4^0	spherical	0.6117	-	0.6604	-
α_6^0		0.3694	-	0.3992	-
α_8^0		0.3148	-	0.1547	-
α_1^1	tilt (x, y)	0.2078	-0.0484	-0.1430	-0.0037
α_3^1	coma (x, y)	0.5710	-0.1110	0.9000	-0.1719
α_5^1		0.1492	-0.1041	0.1455	0.0147
α_7^1		-0.1458	0.0865	-0.0736	0.0307
α_9^1		0.1583	0.0639	0.3482	-0.1608
α_2^2	astigmatism ($0^\circ, 45^\circ$)	0.4113	-0.1159	-0.1296	-0.1044
α_4^2		0.0318	0.0957	-0.0372	0.0267
α_6^2		0.0779	-0.0840	0.0232	0.0097
α_8^2		0.0854	0.0145	0.0080	0.0925

본 연구에서 광학계의 동공함수를 구할 수 있는 방안을 제안하였다. 이 동공함수로부터 파면수차를 해석할 수 있는데, 이를 위해 ENZ 방법을 보다 일반적인 환경에 적용할 수 있도록 개량하였다. 개량한 ENZ 방법으로 β 의 요소가 아주 크지 않은 상황에서, 임의의 광량분포나 파면의 왜곡에 대한 계산에서 해석적인 풀이에 거의 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 특히 NA가 0.85에 이르는 고-NA의 환경에서 고려해야하는 방사효과와 초점벗어나기 효과를 다 반영 하였으므로 이 방법을 사용하는데 대한 제한이 거의 없다고 할 수 있다.

본 연구에서 구현한 수차해석 알고리즘을 검증하기 위해서 인위적으로 3D 빔 데이터를 생성하여 분석하였다. 생성 데이터는 실제의 픽업의 DVD 광학부의 규격과 같은 조건으로 하였으며, $m=0$ 에 대해 $n=0, 2, 4, 6, 8$ 의 차수까지, $m=1$ 에 대해 $n=1, 3, 5, 7, 9$ 의 차수까지, $m=2$ 에 대해 $n=2, 4, 6, 8$ 의 차수까지 β 값들을 부여하였다. 아울러 이렇게 생성된 빔 데이터로부터 수차를 해석할 때에도 동일한 차수까지의 β 값을 해석해 내도록 하였다. 이 모든 값들이 혼재하는 상황에서 $|\beta|^2$ 의 평균값이 ~ 1.0 인 경우에는 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었고, 특히 ~ 0.7 의 경우에는 20 회의 예측-보정법의 반복으로 여섯 자리의 유효자리수 정도로 수렴하는 값을 얻을 수 있었다.

또한 실제의 픽업에 대한 3D 빔 데이터를 측정해서 이의 수차를 복원하였고, 이들 측정치는 마하-젠더 간섭계로 측정된 결과와 $R=0.98$ 정도의 상관관계를 보이므로 생산 현장에서 활용 할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics. Pergamon Press : pp. 459-490, 1987.
- [2] D. R. Neal, W. J. Alford, and J. K. Gruetzner, "Amplitude and phase beam characterization using a two-dimensional wavefront sensor", SPIE 2870, pp. 72-82, 1996.
- [3] A. J. E. M. Janssen, "Extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point-spread functions", Journal of Optical Society of America, Vol. 19, pp. 849-857, 2002.
- [4] J. J. M. Braat, P. Dirksen, S. van Haver and A. J. E. M. Janssen, "Extended Nijboer-Zernike(ENZ) Analysis&AberrationRetrieval", <http://nijboerzernike.nl/>.
- [5] Blu-ray Disc Founders, White paper, Blu-ray Disc Format, General, http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/general_bluraydiscformat-15263.pdf.
- [6] E. Hecht. 광학 4판, 조재홍 등 번역. 두양사 : pp.

33-35, 2002.

- [7] B. R. A. Nijboer, "The diffraction theory of aberrations", Ph.D. dissertation, University of Groningen, 1942.
- [8] C. F. Gerald and P. O. Wheatley. Applied Numerical Analysis. Addison-Wesley, pp. 306-320, 1984.
- [9] C. van der Avoort, J. J. M. Braat, P. Dirksen and A. J. E. M. Janssen, "Aberration retrieval from the intensity point-spread function in the focal region using the extended Nijboer-Zernike approach", Journal of Modern Optics, Vol. 52, pp. 1695-1728, 2005.
- [10] W. Schroeder, K. Martin and B. Lorensen, Visualization Toolkit, An Object-Oriented Approach To 3D Graphics, 4th ed. Kitware, 2006.
- [11] L. S. Avila et al, The VTK User's Guide, Kitware. 2006.

이건기 (Gun-Ki Lee)



1978년 연세대학교 전기공학과 공학사
 1980년 연세대학교 전기공학과 공학석사
 1990년 연세대학교 의용공학과 공학박사
 현재 경상대학교 전자공학과 교수,
 공학연구원, 자동화 컴퓨터 연구센터

*관심분야: 신호처리, 의용전자

정기수 (Ki-Soo Chung)



1979년 서울대 물리교육과 이학사
 1981년 KAIST 물리학과 이학석사
 1991년 KAIST 물리학과 이학박사
 현재 경상대학교 물리학과 교수
 관심분야: 광공학, 분광학

전재철 (Jae-Chul Jun)



1973년 한양대학교 전자공학과 공학사
 2002년 경상대학교 전자공학과 공학석사.
 2009년 경상대학교 전자공학과 공학박사
 현재 한국소니전자(주) 대표이사
 현재 한국신호처리.시스템학회 회장
 *관심분야: 신호처리, 광전자