

Research to Minimize Endoscope and Objective-lens Sensitivity Using Multi-configurations

Mee-Suk Jung[†]

Department of Nano & Semiconductor Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 15073, Korea

(Received October 29, 2021; Revised November 15, 2021; Accepted November 16, 2021)

Recently, lens manufacturing and assembly technology has greatly improved. However, tight requirements of manufacturing and assembly lead to an increase in cost and manufacturing time, and in some cases the performance of an optical system may deteriorate depending on the operating environment's conditions, such as temperature or vibration. In addition, the use of a compensator is an effective method to reduce sensitivity in an ultra-precision optical system, but in the case of a small lens, such as that in an endoscope, it is difficult to use a compensator due to the size limitation of the lens barrel. Therefore, minimizing lens sensitivity is the most important technology in lens design. For this reason, there have been various attempts to reduce the lens sensitivity, and there is a trend to add functions to reduce the sensitivity in the lens design S/W. In this paper, we introduce a design technology that minimizes lens sensitivity. We first design a lens with quite good performance, then analyze the sensitivity of this lens, make a multi-configuration with high-sensitivity element error, and then reoptimize it. We prove with an example that this design technique is very effective.

Keywords: Endoscope lens, Multi-configuration, Objective lens, Tolerance optimization

OCIS codes: (080.2208) Fabrication, tolerancing; (080.2740) Geometric optical design

다중 구성을 이용한 내시경 및 대물렌즈 광학계 공차 민감도 최소화 설계 기술

정미숙[†]

한국산업기술대학교 나노반도체공학과

☎ 15074 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2021년 10월 29일 받음, 2021년 11월 15일 수정본 받음, 2021년 11월 16일 게재 확정)

최근 렌즈 가공 및 측정 기술의 발전에 따라 렌즈의 제작 조립 기술이 개선되었다. 그럼에도 불구하고 렌즈 제작 조립 기술의 상향에 따른 비용 및 제작 기간의 증가, 온도 및 진동 등의 사용 환경 의존도를 해결하지 못해 이에 따른 불안정해지는 성능 등을 극복하지 못하였다. 또한, 초정밀 광학계에서 효과적으로 민감도를 줄이는 방법은 다수의 보상자를 이용하는 방법인데, 특히 내시경 같은 초소형 렌즈의 경우 렌즈 경통 크기 제약으로 인하여 상거리 보상자 이외의 추가적인 보상자 사용에 어려움이 있다. 따라서 렌즈 설계에 있어 공차에 대한 렌즈의 민감도를 최소화하는 것은 무엇보다도 중요한 기술인 바 이를 위한 노력이 필요하며, 렌즈 설계 소프트웨어에서도 민감도를 줄일 수 있는 기능들이 추가되는 추세이다. 본 논문에서는 우선 성능이 최적화된 설계를 도출하고, 이 설계의 민감도를 분석하여 민감도가 높은 요소들을 다중 구성(multi-configuration)에 적용한 뒤 다시 최적화함으로써 렌즈 민감도를 최소화하였으며 사례를 들어 다중 구성 방법이 민감도 저감에 매우 효과적인임을 보여주었다.

Keywords: 내시경 렌즈, 다중 구성, 대물렌즈, 공차 최적화

OCIS codes: (080.2208) Fabrication, tolerancing; (080.2740) Geometric optical design

[†]Corresponding author: msoptic@kpu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3430-876X

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

광학계 기술은 크게 렌즈 설계, 제작, 조립 및 평가 기술로 분류할 수 있다. 실제 광학계의 성능을 확보하기 위해 이 모든 기술은 매우 중요하다. 그러나 비록 초기 성능은 만족시키지만 공차가 민감한 설계로는 광학계의 성능을 확보하기가 어렵다. 보통 광학계의 성패는 제작 및 조립에 가장 작은 공차를 요구하는 요소에 크게 의존한다. 예로 다른 요소들의 공차가 충분히 커서 제작 및 조립에 전혀 문제가 없다고 할지라도 단 하나의 요소가 너무 작은 공차를 요구하게 되면 광학계 성능을 만족시키기 어렵다. 결국 의미 있는 렌즈 설계는 설계 성능을 만족하면서 최소 공차를 극대화하는 것으로 생각할 수 있다^[1-3]. 이러한 이유로 소프트웨어에서도 민감도 개선에 대한 노력이 이루어지고 있다^[4,5].

일반적으로 하나의 공차를 개선하면 다른 요소의 공차가 민감해지게 된다. 그래서 전체적으로 공차의 균형을 유지하면서 최소 공차를 최대화함이 요구된다. 설계자가 사용하는 렌즈 공차를 개선하는 방법 중 하나는 큰 굴절력을 가진 렌즈를 분할하는 것이다. 렌즈의 굴절력이 작아지면 그 렌즈의 공차가 커지는 경향이 있기 때문이다. 그러나 이 방법은 최적화가 진행됨에 따라 분할된 두 렌즈 중 하나의 렌즈가 다시 큰 굴절력을 갖고 다른 하나는 너무 작은 굴절력을 가지게 되어 공차 개선에 도움이 되지 않기도 한다. 이를 막기 위하여 굴절력의 크기에 대해 구속 조건을 부여하고 최적화를 진행하게 되는데, 이때 성능이 떨어지는 경향이 있다. 또 다른 방법은 보상자를 도입하는 것이다. 일반적으로 마지막 렌즈에서 상까지 거리와 상의 기울임을 기본적인 보상자로 사용하는데 여기에 특정 렌즈 사이 거리, 특정 렌즈의 편심(decenter)이나 경사(tilt)를 추가 보상자로 도입함으로써 렌즈 공차를 개선할 수 있다. 비교적 크기가 큰 렌즈의 경우 보상자 조정을 위한 기구적 공간이 충분하므로 매우 효과적인 방법이다. 그러나 소형 대물렌즈나 내시경 같은 초소형 광학계의 경우 렌즈 조정을 위한 공간 확보가 어려워 보상자 사용에 제약이 있다. 특히 내시경 렌즈의 경우는 대칭 수차 보정을 위한 렌즈 간격의 조정은 가능하지만 비대칭 수차 보상을 위한 보상자의 사용은 실질적으로 불가능하다. 이러한 경우는 설계 상에서 공차들이 균형을 가지면서 최소 공차를 최대화하도록 해야 한다. 본 논문에서는 다중 구성(multi-configuration)을 이용하여 공차들이 균형

을 가지고 개선되는 설계 기술을 소개하고, 내시경 렌즈 및 대물렌즈의 예시를 통해 이러한 방법이 매우 효과적임을 보여주 고자 한다.

II. 본 론

본 논문에서 소개하고자 하는 다중 구성을 이용한 공차 개선 방법의 기본 개념은 광학계를 제작하였을 때 나타날 수 있는 상황 중 성능 저하에 크게 영향을 미치는 요소들을 다중 구성하여 최적화함으로써 문제가 될 수 있는 공차의 민감도를 최소화하는 방법이다. 여기서 다중 구성을 이용한 설계 결과는 어떤 공차 요소를 이용하는가에 따라 달라진다. 다중 구성 방법의 효과를 증명하기 위해 우선 내시경 렌즈를 이용하여 기본적인 효과를 확인하고, 대물렌즈를 예시로 실제 수율에 큰 효과가 있음을 보이고자 한다.

일반적으로 조립 오차에 해당하는 렌즈 편심의 민감도가 큰 편이므로, 편심의 민감도에 다중 구성을 이용한 내시경 렌즈를 통해 효과를 살펴보고자 한다. 성능이 최대화되도록 내시경 렌즈를 설계하고 이 설계를 기반으로 초기 설계에서 민감도가 높은 2번, 3번, 5번, 그리고 6번 렌즈의 편심을 다중 구성으로 만들어 최적 설계를 진행한다. 이때 편심의 양은 0.02 mm로 하였으며 이 값은 설계자가 임의로 값을 선택할 수 있다. 표 1은 다중 구성의 내용이다. 여기서 구성 1은 렌즈에 편심이 없는 기본 구성이고, 구성 2는 2번 렌즈에 0.02 mm 편심을 시킨 것이다. 1차 최적화 후 다른 렌즈의 편심도 추가하여 최적화를 진행하였다.

표 2는 초기 설계 렌즈 데이터이며 그림 1은 초기 설계 MTF이다. 표 3은 공차가 개선된 설계 데이터이며 그림 2는 개선된 MTF이다.

실제 렌즈 편심에 의한 민감도의 변화를 보면 그림 3과 같다.

그림 1과 그림 2에서 성능의 변화는 크지 않음을 볼 수 있고, 그림 3으로부터 가중치(weight)의 고려 없이 한 번의 다중 구성을 통하여 최적화된 결과로서 편심에 의한 렌즈 민감도가 크게 줄어들었음을 볼 수 있다.

다중 구성은 렌즈 편심 이외 렌즈 경사나 굴절률, Abbe 수, 렌즈와 렌즈 간 두께 등 모든 설계 변수에 적용할 수 있다. 실제 민감도 개선은 모든 렌즈 변수에 대하여 이루어져야 한다.

Table 1. Multi-configuration

Variables	Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4	Config. 5
2nd lens decenter	0	0.02	0	0	0
3rd lens decenter	0	0	0.02	0	0
5th lens decenter	0	0	0	0.02	0
6th lens decenter	0	0	0	0	0.02

Table 2. Initial endoscope optical system lens data

No.	Radius	Thickness	Glass
OBJECT	Infinity	10	-
1	Infinity	0.477	2.02:29.06
2	1.993	0.556	-
3	-4.060	0.497	729545
4	2.035	0.243	-
5	5.379	0.878	729545
6	-4.597	0.053	-
7	2.977	0.850	729545
8	21.117	0.083	-
9	2.838	1.526	923209
10	1.670	0.041	-
STOP	Infinity	0.030	-
12	2.959	0.792	618634
13	-2.832	0.089	-
14	3.337	1.046	618634
15	-2.632	0.076	-
16	-2.926	0.565	923209
17	-91.472	1.926	-
IMAGE	Infinity	-	-

Table 3. Lens data after sensitivity improvement

No.	Radius	Thickness	Glass
OBJECT	Infinity	10	-
1	Infinity	0.472	2.02:29.06
2	1.995	0.568	-
3	-3.660	0.492	729545
4	2.371	0.214	-
5	5.674	0.864	729545
6	-5.308	0.021	-
7	4.007	0.826	729545
8	-19.249	0.062	-
9	2.867	1.508	923209
10	1.880	0.073	-
STOP	Infinity	0.021	-
12	2.960	1.420	618634
13	-2.708	0.073	-
14	3.646	0.947	618634
15	-3.148	0.073	-
16	-2.749	0.539	923209
17	-52.055	1.913	-
IMAGE	Infinity	-	-

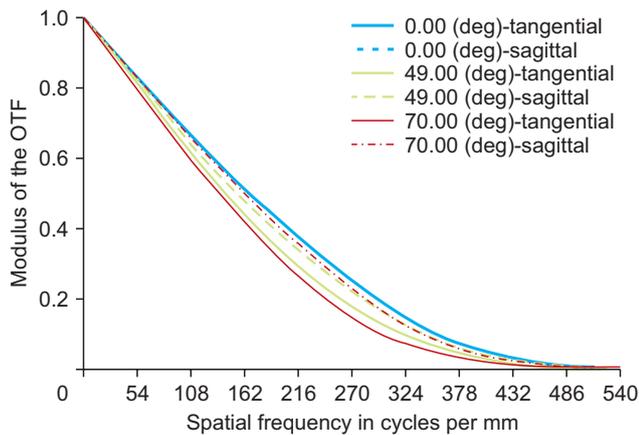


Fig. 1. MTF of initial endoscope optical design.

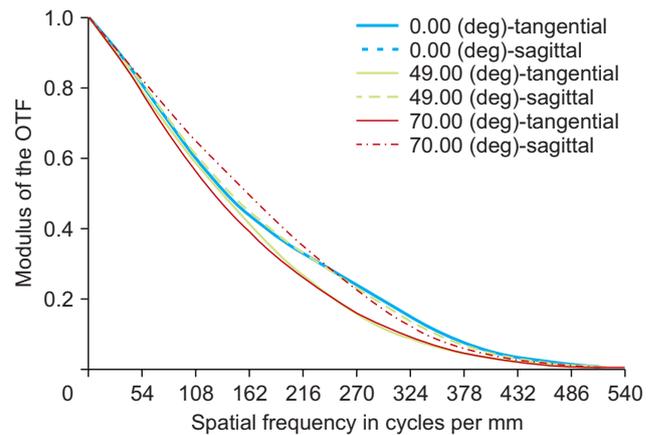


Fig. 2. MTF after improvement of lens decenter sensitivity.

이를 위해서는 다중 구성 후 최적화를 하고 그 결과를 기반으로 다시 다중 구성을 생성하고 다시 최적화를 실행하는 과정을 여러 번 해야만 한다.

이번에는 대물렌즈를 대상으로 다중 구성을 적용한 경우이며 실제 렌즈 수율이 크게 상승되는 것을 볼 수 있다. 공차를 고려하지 않고 최고의 성능을 목표로 설계한 데이터는 표 4와 같으며 렌즈 레이아웃, RMS 파면 수차와 MTF는 그림 4-6과 같다. 그림 5에서 polychromatic RMS 파면 수차(단위: λ (파장))가 광축 상에서 0.0045 λ 이고 비축(off axis) 상에서 0.0265 λ 로 성능이 매우 좋음을 볼 수 있다. 이제 이 설계에 대한 공차 민감도를 계산해 보자. NA 0.15의 회절 한계 광학계의 제작 및 조립 공차는 경험을 토대로 표 5와 같이 선정하였

Change of RMS wavefront aberration due to lens decentering

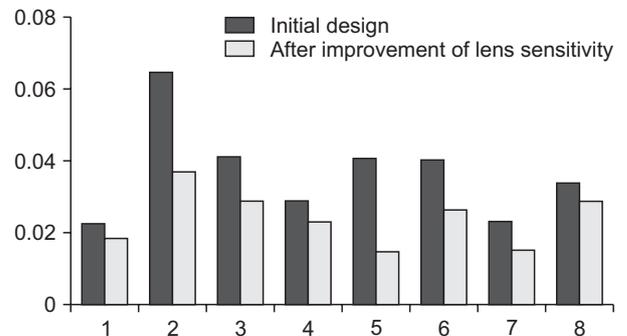


Fig. 3. Effect of lens sensitivity for tolerance improvement.

Table 4. Lens data after optimization

No.	Radius	Thickness	Glass
OBJECT	Infinity	Infinity	-
STOP	30.272	5.929	581408
2	14.353	7.010	-
3	23.327	2.899	847238
4	34.236	3.682	-
5	26.412	4.862	592684
6	-23.561	2.374	-
7	-17.329	2.290	575415
8	14.511	5.328	548742
9	-20.866	6.243	-
10	-30.745	1.987	512626
11	11.811	11.961	-
12	30.991	5.435	497816
13	-24.771	30.000	-
IMAGE	Infinity	0.000	-

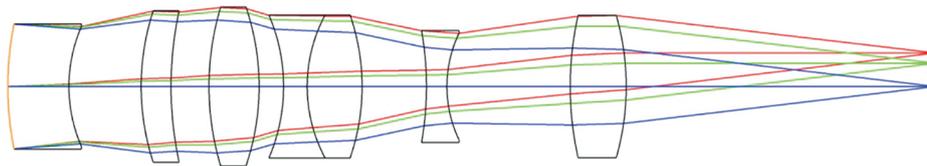


Fig. 4. Objective lens layout.

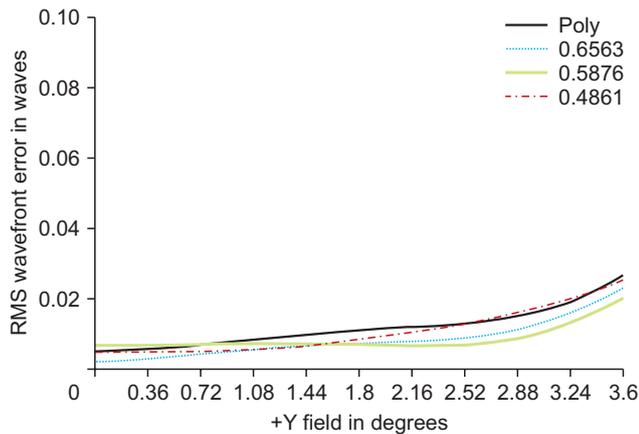


Fig. 5. RMS wavefront error of initial objective lens design.

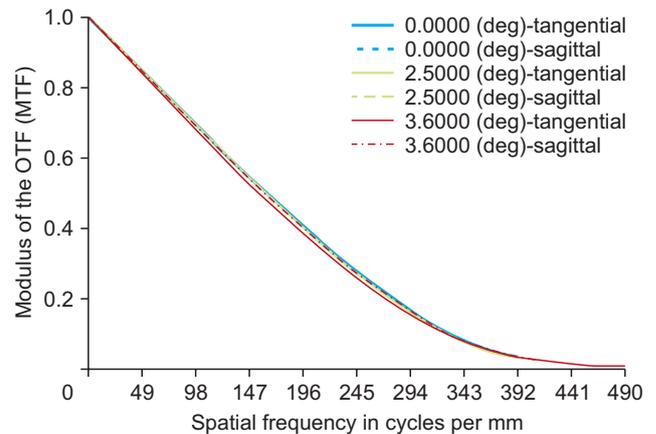


Fig. 6. MTF of initial objective lens.

다. 참고로 이러한 공차 값은 설계자에 따라 다른 값을 가질 수 있다.

표 5의 공차 값에 대한 렌즈 민감도는 표 6과 같다. 표 6의 렌즈 민감도로부터 대부분 렌즈 편심이 큰 민감도를 갖고 있으며 글라스 공차에 대해서는 4번째 렌즈의 Abbe 수에 민감도가 있고 그 외 공차는 큰 민감도를 가지지 않음을 볼 수 있다. 추가로 몬테-카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 통한 제작 후 예상되는 성능, 즉 수율을 분석하면 그림 7과

Table 5. Tolerance values for manufacturing

Tolerance parameters	Values
Radius (Newton ring@632.8 nm)	5
Thickness (mm)	0.05
Surface tilt (ArcSec)	30
Surface irregularity ($\lambda=0.633 \mu\text{m}$)	0.2
Index	0.001
Abbe (%)	0.8
Lens decenter (mm)	0.02
Lens tilt (ArcSec)	30

Table 6. Lens sensitivity for initial lens (criterion: RMS wavefront error)

Nominal RMS wavefront error: 0.0168 (unit: wavelength)					
Variables	Surf. 1	Surf. 2	Value	Criterion	Change
Lens decenter (mm)	5	6	0.02	0.1613	0.1484
	1	2	0.02	0.0972	0.0842
	7	9	0.02	0.0952	0.0822
	10	11	0.02	0.0825	0.0696
	3	4	0.02	0.0682	0.0553
	12	13	0.02	0.0422	0.0292
Abbe error	7	-	0.332	0.0616	0.0486
	5	-	-0.547	0.0349	0.0219
	8	-	-0.594	0.0343	0.0213
Index error	7	-	0.001	0.0339	0.0210
	8	-	0.001	0.0285	0.0155
Thickness error (mm)	4	-	-0.05	0.0371	0.0241
	5	-	-0.05	0.0368	0.0238
	6	-	0.05	0.0324	0.0194
	1	-	0.05	0.0258	0.0129
Surface tilt (deg.)	3	-	0.0084	0.0259	0.0129
	7	-	0.0084	0.0242	0.0113
Radius error (N)	3	-	5	0.0248	0.0118
	7	-	-5	0.0229	0.0100
Lens tilt (deg.)	1	-	0.0084	0.0183	0.0053

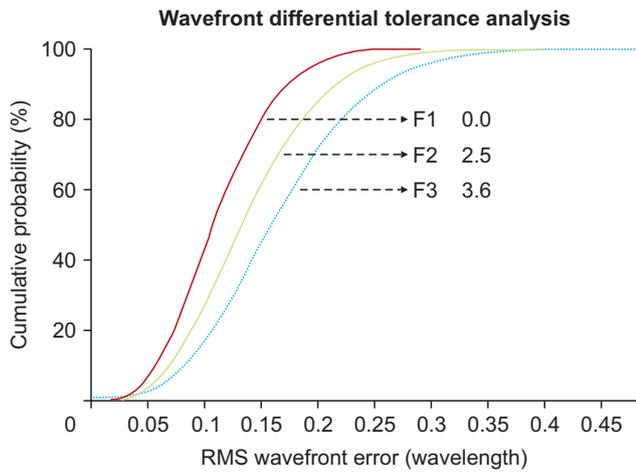


Fig. 7. Expected lens yield.

같다. 그림 7로부터 표 5의 공차에 대하여 90% 기준 예상되는 RMS 파면 수차는 광축 상에 대해서 0.17 λ이고 비축 상에서 0.24 λ로 예상되어 제작 후 광학계 성능에 문제가 될 수 있음을 알 수 있다.

본 논문의 목적인 렌즈 민감도를 줄이기 위해 다중 구성을 이용하여 최적화를 진행해 보았다. 다중 구성은 표 6의 렌즈 민감도로부터 각 렌즈의 편심을 부여한 다중 구성을 만들고, 추가로 7번 면의 Abbe 수와 4번 면의 두께 변화를 부여한 다중 구성을 만든다. 어떤 공차가 개선되면 다른 공차가 민감해 지므로 편심 공차 이외에 민감도가 있는 요소들을 추가하였

Table 7. Lens data after sensitivity improvement

No.	Radius	Thickness	Glass
OBJECT	Infinity	Infinity	-
STOP	48.529	2.949	664360
2	-169.626	2.281	-
3	-56.421	2.196	805254
4	-481.457	1.000	-
5	34.825	3.068	620635
6	-255.382	6.288	-
7	25.299	1.989	549454
8	8.629	4.214	497816
9	14.696	1.651	-
10	724.632	2.000	519574
11	20.266	28.656	-
12	43.383	3.714	497816
13	-39.125	30.005	-
IMAGE	Infinity	0.000	-

다. 다중 구성을 만들고 최적화한 후 렌즈 민감도를 분석하여 민감도가 크게 나타나는 요소에 대해서 새로 추가를 한다. 이러한 방법으로 만족스러운 결과가 나올 때까지 반복하여 진행한다. 다중 구성 최적화 사이클을 여러 차례 반복하여 얻은 설계 결과는 표 7과 같다. 민감도 개선 후 렌즈 레이아웃 및 성능은 그림 8-10과 같다.

최초 설계의 결과와 비교하면 그림 5와 그림 9로부터 다색 (polychromatic) RMS 파면 수차가 광축 상에서 0.0045 λ가 0.0228 λ로 비축 상에서 0.0265 λ에서 0.0475 λ로 성능이

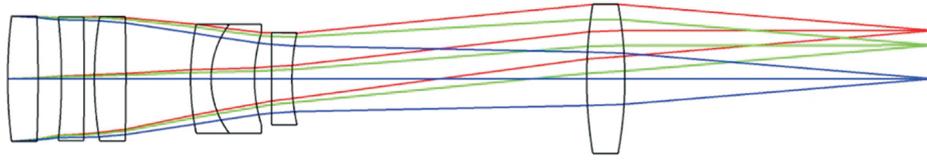


Fig. 8. Objective lens layout after sensitivity improvement.

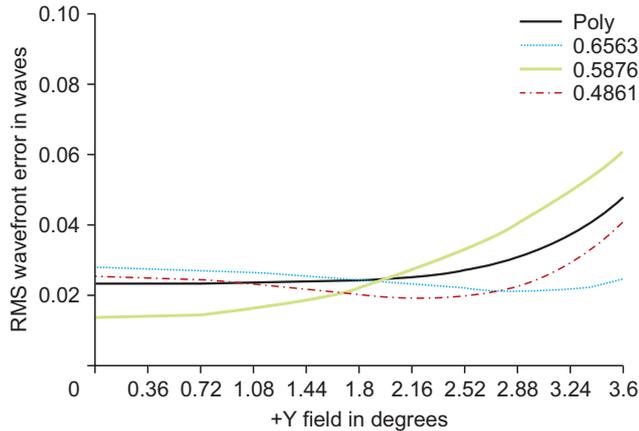


Fig. 9. RMS wavefront error after sensitivity improvement.

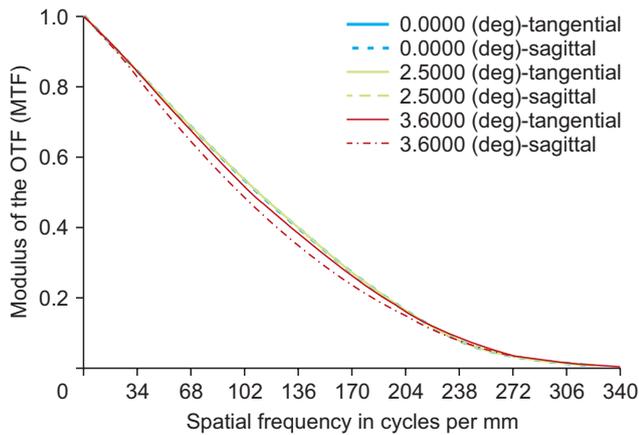


Fig. 10. MTF after sensitivity improvement.

약간 떨어졌음을 볼 수 있다. 성능이 최초 설계보다 떨어지긴 하였지만 여전히 회절 한계 성능을 가지고 있음을 볼 수 있다.

공차 개선 설계의 렌즈 민감도가 얼마나 개선되었는지 확인하기 위해서 초기 설계와 같이 공차에 따른 렌즈 민감도와 예상 수율을 분석하였다. 표 8은 렌즈 민감도, 그림 11은 몬테카를로 시뮬레이션에 따른 예상 수율 그래프이다. 표 8로부터 렌즈의 민감도가 10배 이상 크게 개선됨을 확인할 수 있고, 그림 11로부터 렌즈 수율이 90% 기준으로 광축 상에서 0.078 λ 이고 비축 상에서 0.08 λ 로 제작 후에 광학계 성능이 회절 한계를 가질 수 있는 설계임을 예측할 수 있다.

Table 8. Lens sensitivity after sensitivity improvement

Nominal RMS wavefront error (unit: wavelength): 0.0289					
	Surf. 1	Surf. 2	Value	Criterion	Change
Lens decenter (mm)	3	4	0.02	0.0384	0.0094
	1	2	0.02	0.0383	0.0093
	7	9	0.02	0.0348	0.0058
	5	6	0.02	0.0331	0.0042
	12	13	0.02	0.0306	0.0017
Abbe error	10	11	0.02	0.0302	0.0013
	1	-	0.288	0.0336	0.0047
	7	-	0.363	0.0330	0.0041
Index error	3	-	-0.203	0.0330	0.0041
	12	-	0.001	0.0304	0.0015
Thickness error (mm)	1	-	-0.001	0.0304	0.0014
	9	11	-0.05	0.0308	0.0019
	4	6	0.05	0.0306	0.0016
	10	11	-0.05	0.0304	0.0015
Surface tilt (deg.)	7	9	-0.05	0.0304	0.0015
	3	-	0.0084	0.0312	0.0023
Radius error (N)	4	-	0.0084	0.0308	0.0019
	3	-	-5	0.0346	0.0056
	4	-	5	0.0339	0.0049

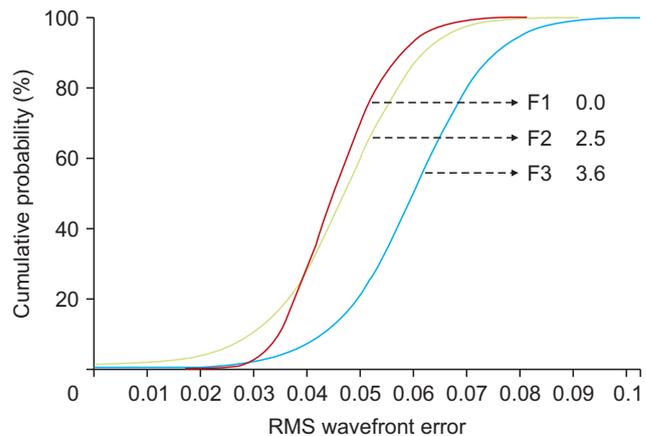


Fig. 11. Yield after sensitivity improvement.

실제 NA나 FOV가 증가하면 공차 개선 효과가 위 예와 같이 10배 이상 개선되는 효과를 얻기가 쉽지 않지만, 확실히 다중 구성을 이용한 공차 개선은 효과가 있음을 알 수 있다. 중요한 부분은 공차 개선 효과가 초기 설계에 크게 의존한다는 것이다.

III. 결 론

잘 알려져 있듯이 의미 있는 렌즈 설계는 비록 초기 성능이 완전하지 않다고 할지라도 공차에 대한 렌즈 민감도가 작은 설계이다. 앞에서 언급하였듯이 렌즈 민감도를 줄이는 방법은 여러 가지가 있다. 이러한 방법의 하나로 다중 구성을 이용한 공차 개선 설계 방법을 소개하였으며 그 효과를 내시경 렌즈와 대물렌즈의 예로 검증하였다. 다중 구성을 이용한 공차 개선의 핵심 아이디어는 제작 후 나타날 수 있는 경우를 설계 최적화에 반영함으로써 렌즈 민감도를 줄이는 것으로 많은 경우 좋은 결과를 얻을 수 있다. 다만 모든 방법에는 단점이 있으며, 다중 구성 방식의 단점은 최적화 과정이 복잡하고 여러 번 반복 적용을 해야 하고 초기 설계에 따라 그 효과가 크게 좌우된다는 점이다.

본 논문에서는 내시경 렌즈의 렌즈 편심에 의한 민감도가 확실히 줄어들고 NA 0.15 대물렌즈에 다중 구성 방식을 적용하여 보상자 없이 제작 후 회절 한계의 결과를 얻을 수 있음을 보여주었다. 효과의 정도는 초기 설계에 의존하지만, 본 논문의 사례에서 10배 이상의 공차 개선 효과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제고유번호: KMDF_PR_20210526_0002-2021-05).

또한, 본 연구는 2021년도 한국산업기술대학교 연구년 교수 연구비에 의해 연구되었음.

References

1. R. Bates, "Performance and tolerance sensitivity optimization of highly aspheric miniature camera lenses," Proc. SPIE **7793**, 779302 (2010).
2. M. Isshiki, D. C. Sinclair, and S. Kaneko, "Lens design: global optimization of both performance and tolerance sensitivity," in International Optical Design Conference 2006 (Optical Society of America, 2006), paper TuA5.
3. I. Powell, "Employment of reverse optimization to relax manufacturing tolerances imposed on system constructional parameters associated with complex optical systems," Appl. Opt. **39**, 2174-2183 (2000).
4. ZEMAX, User manual of OpticStudio 21.3, (2021), p. 1603.
5. Synopsys, "User manual of CodeV 11.3: Optimization reference manual," (2019), p. 69.