

Monte Carlo 방법을 이용한 공초점 주사 현미경의 오차 분석과 정렬 공차 할당에 관한 연구

유홍기*, 강동균*, 이승우*, 권대갑*

Error Analysis and Alignment Tolerancing for Confocal Scanning Microscope using Monte Carlo Method

Hong-Ki Yoo*, Dong-Kyun Kang*, Seung-Woo Lee*, Dae-Gab Gweon*

ABSTRACT

The errors can cause the serious loss of the performance of a precision machine system. In this paper, we proposed the method of allocating the alignment tolerances of the parts and applied this method to get the optimal tolerances of a Confocal Scanning Microscope. In general, tight tolerances are required to maintain the performance of a system, but a high cost of manufacturing and assembling is required to preserve the tight tolerances. The purpose of allocating the optimal tolerances is minimizing the cost while keeping the high performance of the system. In the optimal problem, we maximized the tolerances while maintaining the performance requirements. The Monte Carlo Method, a statistical simulation method, is used in tolerance analysis. Alignment tolerances of optical components of the confocal scanning microscope are optimized to minimize the cost and to maintain the observation performance of the microscope. We can also apply this method to the other precision machine system.

Key Words : Error Analysis (오차 분석), Tolerance Allocation (공차 할당), Confocal Scanning Microscope (공초점 주사 현미경), Monte Carlo Method (Monte Carlo 방법), Tolerance Optimization (공차 최적화)

1. 서론

공초점 주사 현미경은 전처리 과정이 간단하고, 초당 수 프레임 정도의 빠른 측정 속도를 갖을 뿐 아니라 공초점 원리를 이용하여 수평 및 수직 분해능을 향상시킨다. 특히, 깊이 분별력(depth discrimination)이 뛰어나서 시편의 높이 측정을 할 수 있고, 생물 시편 내부의 관찰과 3 차원 형상 복

원이 가능하다는 면에서 다른 측정장비와 차별성을 갖는다. 또한, 관찰할 때에 시편의 손상이 별로 없기 때문에, 살아있는 생물 시편의 관찰도 가능하다. 따라서, 생물의 신진대사에 관한 연구에도 이용될 수 있다. 초당 수 프레임 이상의 빠른 측정 속도 때문에 신속함을 요구하는 산업 현장에서도 응용되고 있다.

모든 기계 제품과 마찬가지로 측정 장비는 설계 치수대로 정확히 제작되고 조립되어야 제 기능

접수일: 2003 년 4 월 3 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일

교신처자 : 한국과학기술원 기계공학과

Email : turtle99@kaist.ac.kr, Tel(042) 869-5225

* 한국과학기술원 기계공학과

을 발휘할 수 있다. 제작 및 조립 과정에서의 오차는 측정 장비에 치명적인 결함을 야기시키고 측정 성능을 급격히 저하시킬 수 있다. 그러므로 설계 과정에서, 성능에 영향을 미치지 않을 정도의 공차를 할당해 주어야 한다. 이 때 공차를 너무 엄격하게 줄 경우, 성능은 보장할 수 있으나 비용 면에서 큰 부담을 준다. 반대로 공차를 너무 크게 설정할 경우, 제작은 용이하나 목표 성능을 보장할 수 없게 된다. 따라서, 비용과 성능을 모두 만족시킬 수 있는 최적 공차 할당이 필요하다.

기계 부품의 조립 신뢰도에 기반을 둔 부품 치수의 최적 공차 할당에 관한 연구는 이전에 수행되었다.^{1),2)} 본 논문에서는 시스템의 성능에 주요 관심을 둔다. 광학 시스템에서, 원하는 성능을 보장하면서 부품의 정렬 공차를 최대한 크게 설정할 수 있는 최적 공차 할당 방법을 제시하고, 공초점 주사 현미경을 대상으로 하여 최적 공차 할당을 수행하였다.

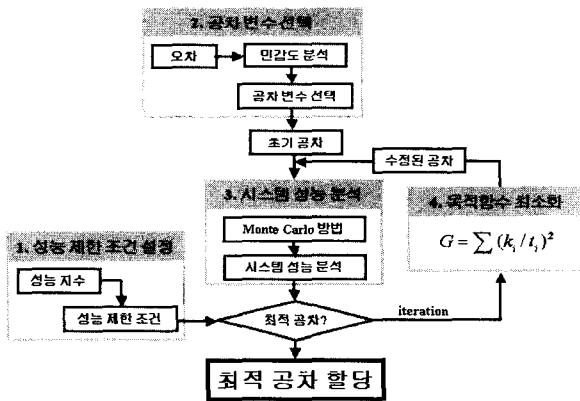


Fig. 1 Flow Chart of Tolerance Allocating Process

2. 최적 공차 할당 방법

실질적으로 기계 시스템을 제작할 때, 설계 치수대로 가공하여 조립하는 것은 불가능하다. 따라서, 공차를 할당해 주게 되는데, 이는 불가피하게 발생하는 오차를 공차 이내로 유지해야 함을 의미한다. 일반적으로 기계 시스템에서 공차가 크면, 제작 및 조립이 용이하기 때문에 비용이 적게 드는 반면, 시스템의 성능을 보장하지 못할 수 있다. 즉 최적 공차 할당을 통해 비용과 성능 사이

에서 적절한 타협점을 찾아야 한다. 본 장에서는 시스템의 성능을 보장할 수 있는 한도 내에서 공차를 최대화 할 수 있도록 최적 공차를 할당하는 방법을 소개한다. 정렬 공차를 최대화 한다는 것은 조립 비용을 최소화 한다는 의미이다. 최적 공차 할당 방법은 Fig.1 에서 보는 바와 같이, 성능 제한 조건 설정, 공차 변수 선택, 시스템 성능 분석, 최적화를 통한 공차 할당 과정을 거치게 된다.

2.1 성능 제한 조건 설정

이미 언급한 바와 같이, 기계 시스템에서는 할당된 공차에 따라 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차는 시스템의 성능 저하를 불러올 수 있다. 따라서, 공차를 할당하여 그에 대한 오차가 발생하더라도 시스템의 성능 저하가 받아들일 만한 수준으로 유지되어야 한다. 따라서, 시스템의 성능에 대한 제한 조건을 설정하여 오차에 의해 시스템의 성능이 저하 되더라도 제한 조건은 만족시킬 수 있도록 최적 공차가 할당되어야 한다.

성능에 대한 기준은 주관적이다. 구매자의 요구에 맞도록 성능 제한 조건이 결정될 수도 있고, 설계자의 공학적 감각에 의해 결정되기도 한다. 일반적으로 광학 시스템에서는 초점 평면에서 Spot 의 크기, 측정 광량의 세기, 신호 대 잡음 비 (S/N ratio), 수차의 RMS 값, Full-Width-Half-Maximum(FWHM), 상의 횡방향 및 광축 방향 분해능 등 다양한 값이 시스템의 성능을 나타낼 수 있고, 이러한 성능 지수들이 필요에 따라 제한 조건으로 설정될 수 있다.

2.2 공차 변수 선택

일반적으로 부품의 정렬 오차가 발생하면 시스템의 성능 저하가 나타난다. 이 때 모든 오차에 대해 공차를 할당할 경우 불필요하게 많은 계산량이 필요하기 때문에, 성능에 큰 영향을 미치는 오차들을 선택하여 공차를 할당한다.

시스템의 성능저하(δS)와 오차(e_i) 사이에는 식(2.1)과 같은 함수 관계가 있다.

$$\delta S = f(e_1, e_2, \dots, e_N) \quad (2.1)$$

일반적인 광학 시스템에서, 위의 함수 관계를 분석적인 방법으로는 얻기 어렵기 때문에, 실험이나 시뮬레이션을 통해 위의 관계를 얻게 된다. 성

능저하(δS)와 오차(e_i)의 관계를 구해보면, 대체로 Fig.2 와 같이 나타난다.

Fig.2 에서 오차 e_1 , e_2 와 같은 경우는 e_3 보다 훨씬 민감함을 알 수 있다. 따라서, e_1 , e_2 는 공차 변수로 선택하여 공차 할당을 해 주고, e_3 는 공차 할당에서 제외하고, 일반 공차를 할당하면 된다. 시스템의 모든 정렬 오차에 대해 오차-성능 관계를 분석해서, 민감한 오차를 공차 변수로 선택하여 공차를 할당해 주면 된다.

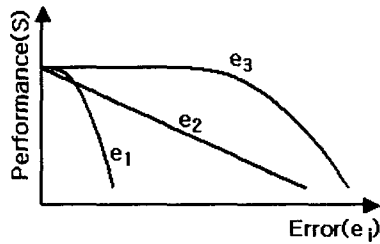


Fig. 2 Relationship between system Performances and various Errors

2.3 시스템 성능 분석

공차 할당을 위해서는 우선, 각 부품에 특정 공차를 할당하였을 경우에 대해서 시스템의 성능 변화를 알아야 한다. 할당된 공차에 대한 시스템의 성능을 분석하는 방법은 여러 가지가 제안되었다. WOW 모델(Worst On Worst analysis model), RSS 모델(Root Sum Squared analysis model), HLM 시뮬레이션(High-Low-Median simulation), Monte Carlo 방법 등 다양한 방법이 사용되고 있다.³⁾

WOW 모델은 확률적으로 일어나기 힘든 최악의 상황을 고려하기 때문에, 현실과는 거리가 있는 지나치게 엄격한 방법이다. RSS 모델, HLM 시뮬레이션 등은 부품의 치수 공차와 같이 선형적인 경우에 적합하다. 따라서, 부품의 정렬 공차 문제와 같은 무작위 적이며, 비선형적인 문제를 실제 현상과 비슷하게 분석하기 위해서는 Monte Carlo 방법이 적합하다. 본 논문에서는 시스템의 성능 분석에 Monte Carlo 방법을 사용하였다.

Monte Carlo 방법은 문제가 복잡해서, 분석적인 방법으로 답을 찾을 수 없을 때 사용하는 수치 해석적 방법의 일종이다. 넓은 의미에서, 무작위적인 수를 생성하고, 이를 이용하여 통계적인 해석을 수행하는 방법을 Monte Carlo 방법이라 한다.⁴⁾

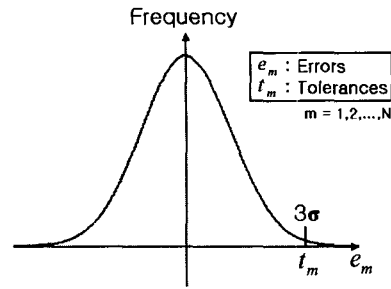


Fig. 3 Distribution of Errors according to the given Tolerance

특정한 오차가 발생했을 때 나타나는 성능저하 δS 는 식(2.1)과 같은 관계를 통해서, 한번의 시뮬레이션 결과로부터 얻을 수 있다. 하지만, 특정한 공차를 할당했을 때 시스템의 성능 저하를 예측하는 것은 쉽지 않다. δS 와 e_i 의 관계는 쉽게 얻을 수 있으나, δS 와 공차(t_i)의 관계는 한번의 시뮬레이션으로 얻을 수 없기 때문이다.

공차 t_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 가 주어질 경우, 오차 (e_i)는 Fig.3 과 같이 정규 분포의 확률을 가지고 임의적으로 발생한다고 가정할 수 있기 때문이다. 따라서, Monte Carlo 방법을 사용해서 많은 수의 계산을 반복하여, 주어진 확률 분포를 가지고 오차가 발생할 경우 시스템의 성능 저하를 분석하면 공차와 성능의 관계를 찾을 수 있다.

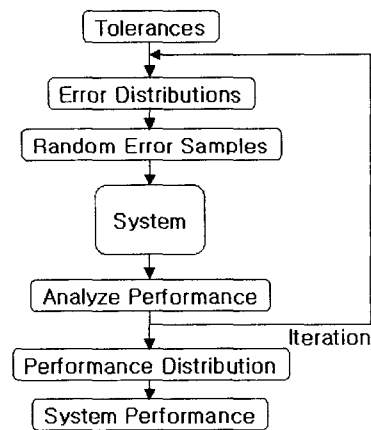


Fig. 4 Flow Diagram of Performance Analysis, using Monte Carlo Method

Monte Carlo 방법을 이용해서, 할당된 공차에 대한 시스템의 성능을 분석하는 흐름도는 Fig.4 와 같다. 우선, 오차 e_i 에 공차 t_i 가 할당되면 Fig.3 과 같은 오차의 확률 분포를 생성할 수 있다. 이때, 공차는 3σ 로 관리된다고 가정하였다.

그 후, 생성된 확률 분포로부터 각 부품에서 무작위적으로 오차들 e_{ik} ($k = \text{iteration number}$) 를 추출해 내고, 식(2.1)의 함수 관계를 이용하여, 생성된 오차 set 에 대한 성능 저하를 식(2.2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\delta S_k = f(e_{1k}, e_{2k}, \dots, e_{Nk}) \quad (2.2)$$

이 과정을 무수히 반복하면 시스템의 성능 δS_k 는 Fig.5 와 같은 분포를 갖게 된다. 공차가 3σ 로 관리된다고 가정하였으므로, 성능 저하도 이에 해당하는 99.73% 부분을 고려하면 주어진 공차에 대한 성능저하 δS_i 를 예측할 수 있게 된다.

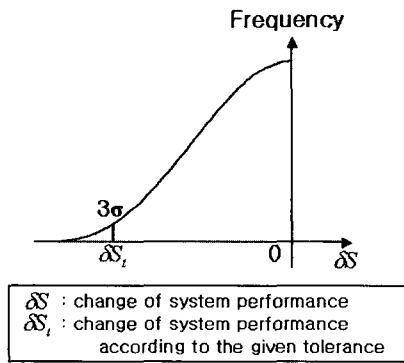


Fig. 5 Performance Distribution of the System according to the given Tolerance

2.4 최적 공차 할당

이미 언급한 바와 같이 최적 공차 할당 문제는 성능을 제한조건으로 하고 공차를 최대화하는 문제로 바꾸어 생각할 수 있고, 따라서 아래와 같은 목적함수를 최소화하는 문제로 생각할 수 있다.

$$G(t_1, t_2, \dots, t_n) = \sum_{m=1}^n (k_m / t_m)^2 \quad (2.3)$$

$k_m = \text{scale factor}$

2.1 절에서 설정한 성능 제한 조건을 만족시키면서 위의 목적함수를 최소화 시키면 최적 공차를 얻을 수 있다. 목적함수와 제한 조건이 이와 같이 결정되면, 일반적인 최소화 알고리즘을 사용하여, 최적 공차를 구할 수 있다.

3. 공초점 주사 현미경

공초점 주사 현미경은 Fig.6 에서 보는 바와 같이, 시편의 초점에서 나온 빛만이 핀홀을 통과하여 검출기에 도달할 수 있다. 따라서, 공초점 주사 현미경은 깊이 방향 분별력을 가지며 시편의 내부 형상도 3 차원으로 복원해 낼 수 있다. 이러한 특성 덕분에 공초점 주사 현미경은 생물학, 생의학, 제품 검사, 측정학 등 여러 분야에서 응용되고 있다.⁵⁾

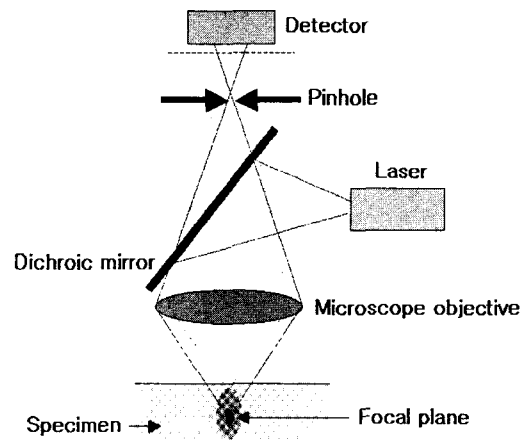


Fig. 6 Schematic Diagram of Confocal Microscope

공초점 주사 현미경의 깊이 분별력은 광축 방향 응답 특성(Axial Response)을 통해서 알 수 있다. 평면 거울 시편을 광축 방향으로 이동시키면서 광량을 측정하면 Fig.7 과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 평면 거울이 초점 거리에 있으면 광량이 크고, 초점에서 벗어날수록 광량이 작아짐을 알 수 있다. 이 때, 최대 광량의 반이 되는 부분의 두께를 FWHM(Full-Width Half-Maximum)으로 정의하는데, 이것이 깊이 분별력의 척도로 사용될 수 있다.

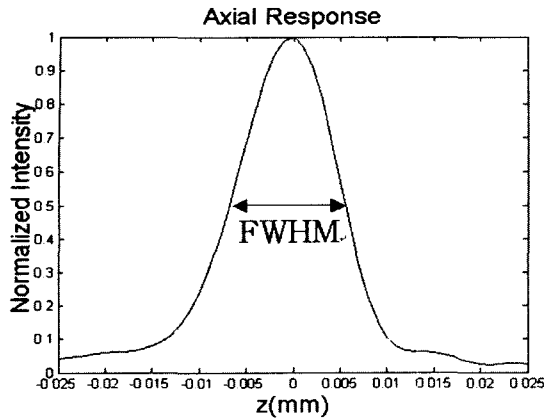


Fig. 7 Axial Response of Confocal Microscopez : axial displacement of specimen

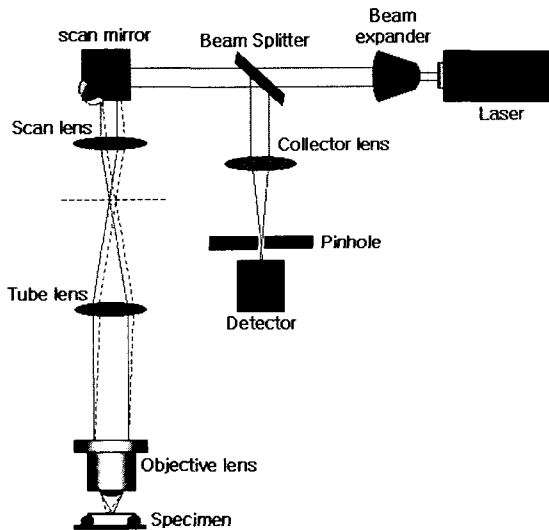


Fig. 8 Confocal Microscope System

4. 공초점 주사 현미경의 오차 분석

Fig.8 은 본 논문에서 오차 분석 및 공차 할당에 사용한 공초점 주사 현미경의 구조를 나타내고 있다. 시스템을 간단히 하기 위해, x-축 방향의 주사 부분만을 포함하였다.

FWHM 이 작으면 작을수록 깊이 분별력은 뛰어나고, 따라서 더욱 미세한 구조를 관찰할 수 있

다. 공초점 주사 현미경에서 FWHM 을 줄이기 위해, 4pi-공초점 주사 현미경, 2-photon 공초점 주사 현미경 등 다양한 연구들이 진행되고 있다.⁶⁾

공초점 주사 현미경에서는 측정되는 광량의 크기도 매우 중요하다. 여러 광학계에 의한 손실, 편홀에 의해 차단되는 빛, 광 검출기의 낮은 효율 등으로 인해, 형광 되어 나온 빛 중 아주 작은 양만이 검출될 수 있다. 따라서 효율이 높은 광학 부품을 사용하거나, 검출 효율이 높은 검출기를 사용하고, 반사 광학계를 이용하여 측정 민감도를 향상시키는 등 광량의 손실을 막기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔다.⁷⁾

이처럼, 공초점 주사 현미경의 FWHM 과 측정 광량은 시스템의 성능을 대변한다. 만약, 공초점 주사 현미경의 광학 부품들에 정렬 오차가 발생할 경우, FWHM 과 측정 광량은 설계 값을 갖지 못하게 된다. 따라서, 본 장에서는 광학 부품들의 정렬 오차가 FWHM 과 측정 광량에 미치는 영향을 분석하도록 한다.

4.1 단일 오차 분석

모든 광학 부품에 오차가 없을 경우 FWHM 은 13.26 μm 이고, 이 때의 측정 광량을 1 로 정규화하였다. 이미 언급한 바와 같이, 광학 부품에 오차가 발생할 경우 FWHM 이 증가하여 깊이 방향 분별력이 저하하고, 측정 광량이 감소하여 측정 성능이 나빠진다. 광학 부품의 단일 오차에 대한 FWHM 과 측정 성능의 변화를 파악하여, 각 부품이 전체 성능에 미치는 경향을 알 수 있다. 단일 오차가 발생하여 FWHM 이 13.51 μm 로 증가하거나, 측정 광량이 0.975 로 떨어지는 오차의 크기를 각 광학 부품 별로 찾아 보았다. Table.1은 이 기준을 초과하게 되는 오차의 크기를 나타내고 있다.

횡 방향 위치오차의 경우를 살펴보면, 스캔 렌즈(Scan Lens), 튜브 렌즈(Tube Lens), 대물 렌즈(Objective Lens), 빔 스플리터(Beam Splitter)의 경우 비교적 큰 오차가 발생해야 기준만큼의 성능 저하가 나타난 반면, 집광 렌즈(Collector Lens)와 핀홀(Pinhole)의 경우는 2 μm 정도로 상당히 작은 오차가 발생하여도 기준을 초과하는 성능 저하가 나타났다.

빔 스플리터와 집광 렌즈의 회전오차가 측정 성능에 큰 영향을 미친다. 또한, 광학 부품의 광축 방향 위치오차에 대해서는 1mm 까지는 기준 만큼

의 성능 저하가 나타나지 않았다. 광축 방향 위치 오차는 측정 성능 저하에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.2 복합 오차 분석

4.1 절에서는 각 광학 부품의 단일 오차에 대해 시스템의 성능을 분석하여 보았다. 이를 통해서 각 부품이 성능에 어느 정도 영향을 미치는지 그 경향성을 파악할 수 있다. 그러나, 실제로는 모든 광학 부품의 오차들이 동시에 발생하기 때문에, 오차가 복합적으로 존재할 때 시스템의 성능을 분석해야 한다.

두 가지 오차에 공차를 할당한 경우에 대해서 2.3 절에서 설명한 방법으로 시스템의 성능 변화를 분석해 보자. 집광렌즈에 횡방향 위치 공차 2 μm , 회전 공차 0.2° 를 주었을 경우에 대해서, FWHM 과 측정 광량의 변화를 알아본다.

우선 $3\sigma_1=2\ \mu\text{m}$, $3\sigma_2=0.2^\circ$ 의 확률 분포를 갖도록 무작위적인 오차를 생성해 낸다. Fig.9 은 생성된 오차들을 히스토그램으로 표시한 것이다.

여기서는 2000 개의 오차 샘플을 생성하였는데, 각각의 오차들을 공초점 주사 현미경에 적용하여 FWHM 과 측정 광량을 구한다. 이런 과정을 통해서 FWHM 과 측정 광량이 갖는 분포를 얻을 수 있다.(Fig.10)

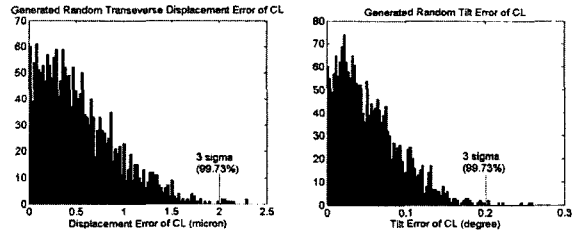


Fig. 9 Histogram of Generated Random Errors of Collector Lens (a) Transverse Displacement Error (b) Tilt Error

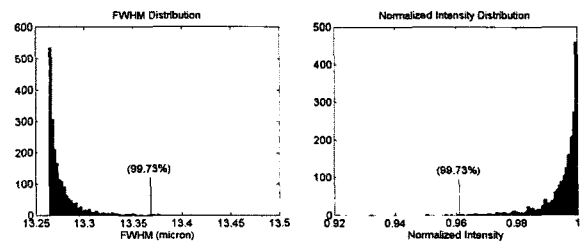


Fig. 10 Histogram of (a) FWHM and (b) Intensity

FWHM 과 측정 광량의 분포에서 3 σ 에 해당하는 99.73%를 포함하는 영역을 확인할 수 있다. 결과적으로 FWHM 은 13.26~13.37 μm , 측정 광량은 0.961~1.000 의 범위 안에서 99.73%의 확률로 분포함을 알 수 있다.

이미 언급한 바와 같이 공차를 할당할 경우, 어느 정도의 성능 저하를 감수해야 한다. 즉, 집광렌즈에 횡방향 위치 공차 2 μm , 회전 공차 0.2° 를 주었을 경우, FWHM 은 13.37 μm 로 증가할 수 있고 측정 광량은 0.961로 감소할 수 있다.

이번 예에서는 2 개의 오차만 존재하고, 나머지 오차는 없다고 가정하였지만, 모든 오차가 동시에 존재할 때에도 같은 방법으로 시스템의 성능 변화를 분석할 수 있다.

5. 공차 할당

2 장에서 소개한 방법에 따라, 공초점 주사 현미경의 광학 부품에 대해 최적 공차 할당을 수행하였다.

Table 1 Errors which meet the Criteria (FWHM = 13.51 μm or Intensity = 0.975)

평 방향 위치오차 Offset (μm)	Scan Lens	76.43
	Tube Lens	334.57
	Objective Lens	254.92
	Beam Splitter	169.73
	Collector Lens	2.22
회전오차 tilt ($^\circ$)	Scan Lens	3.557
	Tube Lens	2.130
	Objective Lens	-
	Beam Splitter	0.002
	Collector Lens	0.199
광축 방향 위치오차 Offset	1mm까지는 기준만큼 성능저하가 나타나지 않았다.	

5.1 성능 제한 조건

4 장에서 언급한 바와 같이, FWHM 과 측정 광량은 공초점 주사 현미경의 측정 성능을 대변한다. 따라서 이에 대한 조건을 성능 지수(S)로 설정하였다. 오차가 전혀 없을 경우에는 FWHM 이 13.26 μm , 측정 광량이 1 이다. 성능 지수에 대한 제한 조건을 FWHM 은 13.51 μm 이하, 측정 광량은 0.975 이상으로 설정하고, 시스템의 성능이 이 조건을 벗어나지 않도록 공차 할당을 해 준다.

이 조건은 시스템에 잡음이 2.5% 정도일 경우에 나타나는 성능 저하이다. 광학 부품의 정렬 오차에 의한 성능 저하가 잡음에 의한 성능 저하보다는 작게 유지되도록 하기 위해 이러한 조건을 설정하였다. 이 조건을 부등식으로 표현하면 식 (5.1)과 같다.

$$\begin{aligned} FWHM_{\max} &< 13.51\mu\text{m} \\ Intensity_{\min} &> 0.975 \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.2 검출부 광학 부품의 공차 할당

5.2.1 공차 변수

4.1 절에서 각 광학 부품의 단일 오차가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이 결과에서 집광렌즈의 횡방향 위치 오차와 회전 오차, 핀홀의 횡방향 위치 오차, 광 분리기의 회전 오차에 대해서는 작은 오차만 발생하여도, 시스템의 성능에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 이들 4 가지 오차를 공차 변수로 선택하여 공차 할당을 수행하였다. 선택된 공차 변수는 Table 2 와 같다.

Table 2 Tolerance Variables of Detection Parts

t1	offset tolerance of collector lens
t2	tilt tolerance of collector lens
t3	tilt tolerance of beam splitter
t4	offset tolerance of pinhole

5.2.2 목적 함수

제작 및 조립 관점에서 볼 때, 공차를 크게 설정하면 적은 비용과 노력으로 시스템을 제작할 수 있기 때문에, 공차는 크면 클수록 좋다. 따라서 목적 함수를 아래의 식(5.2)과 같이 설정하고, 이를 최소화 하도록 한다. 다만, 5.1 절에서 제시한 성능

제한 조건은 만족시켜야 한다. 이때 scale factor 는 렌즈의 형상과 단위를 고려하여 결정하였다.

$$f = \left(\frac{k_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{k_3}{t_3}\right)^2 + \left(\frac{k_4}{t_4}\right)^2 \quad (5.2)$$

k_1, k_4 : linear scale factor = 1
 k_2, k_3 : angular scale factor = 2.86

5.2.3 최적화

SQP 알고리즘을 사용해서 이 문제를 최적화하여, 최적 공차를 얻었다. 목적함수는 5.2.2 절에, 제한 조건은 5.1 절에 언급한 것과 같고, 각 iteration 시에 성능 제한 조건을 계산할 때 Monte Carlo 방법을 사용하여 주어진 공차에 대한 시스템의 성능을 계산하였다. 이를 통해 얻은 최적 공차는 Table 3 과 같다.

이 결과에서 집광 렌즈와 핀홀의 횡방향 위치 공차는 1 μm , 광 분리기의 회전 공차는 0.002° 로 설정해야 함을 알 수 있다. 이 값은 일반적인 가공으로는 유지할 수 어려운 크기이다. 이렇게 민감한 반응을 나타낸 이유는, 위의 오차들이 발생하면, Spot 의 위치가 핀홀을 벗어나게 되기 때문이다. 따라서, 이 오차들은 핀홀에 마이크로 스테이지를 이용하여 잡아 주어야 한다.

이렇게 마이크로 스테이지를 이용하면, 검출부 광학 부품의 정렬 오차들은 보상할 수 있다. 실제로 일부 상용품에서 핀홀의 위치를 미세하게 정렬할 수 있도록 하고 있다.⁸⁾

Table 3 Allocated Optimal Tolerances of Detection Parts of the Confocal Scanning Microscope

Tolerance variables	Optimal tolerance
t1 : offset tolerance of collector lens	1.063 μm
t2 : tilt tolerance of collector lens	0.100°
t3 : tilt tolerance of beam splitter	0.002°
t4 : offset tolerance of pinhole	1.045 μm

5.3 주사부 광학 부품의 공차 할당

5.2 절에서는 성능에 가장 민감한 검출부 부품의 정렬 오차에 대한 공차 할당을 수행하였다. 그 결과, 핀홀에 마이크로 스테이지를 사용하여 위 오차들을 관리할 수 있음을 알 수 있었다. 5.3 절에서는 주사부 광학 부품의 정렬 공차 할당에 대해 이야기하겠다.

5.3.1 공차 변수

주사부 광학 부품은 스캔 렌즈, 튜브 렌즈, 대물 렌즈를 포함한다. 이들 오차에 대한 공차 변수는 Table 4 와 같다.

Table 4 Tolerance Variables of Scanning Parts

t5	offset tolerance of scan lens
t6	tilt tolerance of scan lens
t7	offset tolerance of tube lens
t8	tilt tolerance of tube lens
t9	offset tolerance of objective lens

5.3.2 목적 함수

목적 함수는 5.2.2 절에서와 비슷하게, 아래의 식(5.3)과 같이 설정하였다.

$$f = \left(\frac{k_5}{t_5}\right)^2 + \left(\frac{k_6}{t_6}\right)^2 + \left(\frac{k_7}{t_7}\right)^2 + \left(\frac{k_8}{t_8}\right)^2 + \left(\frac{k_9}{t_9}\right)^2$$

$k_5, k_7, k_9 : \text{linear scale factor} = 1$
 $k_6, k_8 : \text{angular scale factor} = 2.86$

(5.3)

5.3.3 최적화

5.2.3 에서와 같이, SQP 알고리즘을 사용하여 최적 공차를 얻었다. (Table 5) 이 결과와 같이 정렬 공차를 할당해서 시스템을 제작할 경우, 최소의 비용으로 원하는 성능을 만족하는 시스템을 제작할 수 있다.

Table 5 Allocated Optimal Tolerances of Scanning Parts of the Confocal Scanning Microscope

Tolerance variables	Optimal tolerance
t5 : offset tolerance of scan lens	59.66 μm
t6 : tilt tolerance of scan lens	1.66°
t7 : offset tolerance of tube lens	175.09 μm
t8 : tilt tolerance of tube lens	0.91°
t9 : offset tolerance of objective lens	132.33 μm

6. 결론

본 논문에서는 Monte Carlo 방법을 이용하여, 주어진 공차에 대한 시스템의 성능 저하를 분석하는 방법을 제시하였고, 이를 바탕으로 최적 정렬

공차 할당 방법을 제안하였다. 대상 시스템으로써 공초점 주사 현미경을 선정하여, 각 광학 부품의 정렬 오차가 시스템의 측정 성능에 미치는 영향을 분석하였고, 제안한 방법을 이용하여 최적 정렬 공차 할당을 수행하였다. 그 결과, 검출부 부분의 정렬 오차는 편홀에 마이크로 스테이지를 적용함으로써 보상해 주어야 한다는 결론을 얻을 수 있었고, 주사부 광학 부품에 대한 공차 할당을 통해서, 최소의 비용으로 원하는 성능을 얻을 수 있는 최적 공차를 얻었다.

참고문헌

1. Woo-Jong Lee, T. C. Woo, "Tolerances: Their Analysis and Synthesis," Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol. 112, pp. 113-121, May 1990
2. B. K. A. Ngoi and Ong Jon Min, "Optimum Tolerance Allocation in Assembly," International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15, pp. 660-665, 1999
3. Chih-Young Lin, "study of an assembly tolerance allocation model based on Monte Carlo simulation," Journal of Materials Processing Technology 70, pp. 9-16, 1997
4. I.M.Sobol', "The Monte Carlo Method," The University of Chicago Press, 1974
5. Min Gu, "Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes," World Scientific, 1996
6. C.J.R.Sheppard, "Confocal Laser Scanning Microscopy," Springer-Verlag, 1997
7. James B. Pawley, "Handbook of Biological Confocal Microscopy," Plenum press, 1995
8. Carl Zeiss homepage. <http://www.zeiss.com/>