

반도체 와이어 본딩 검사용 다중배치 현미경 광학계에 대한 공차분석

류재명 · 이해진 · 강건모

삼성테크윈(주) 광디지탈사업부 선도기술팀
Ⓣ 641-716 경상남도 창원시 성주동 42번지

정진호

프로옵틱스 연구소
Ⓣ 467-850 경기도 이천시 대월면 사동리 347-138번지

백승선

대전보건대학 안경광학과
Ⓣ 300-711 대전광역시 동구 가양2동 77-3번지

조재홍[†]

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2006년 1월 13일 받음, 2006년 3월 28일 수정본 받음)

가우스 팔호법을 이용한 굴절능 배치 방법과 등가렌즈 설계법으로 기존에 설계한 반도체 와이어 본딩 검사용 다중배치 현미경 광학계에 대한 공차 분석을 하였다. 축상 대칭 공차인 곡률과 두께에 대한 공차는 회절 한계에 의한 초점심도 내에서 후방초점거리(BFL)가 변화도록 결정하였고, 축 비대칭 공차인 decenter와 tilt에 대한 공차는 0.7 field에서 공간주파수 50 lp/mm에서의 MTF(Modulation Transfer Function) 변화가 5% 이내가 되도록 시행착오 방법으로 정하였다. 이 결과 공차분포확률에 관계없이 MTF의 감소율이 5% 미만 되는 곳에 가장 많은 확률로 공차가 분포하므로 위와 같은 방법으로 공차를 부여하면 원하는 본 광학계의 결상 성능을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

주제어 : Geometrical optics, Lens design, Multi-configurative microscopic system, Illumination system, Tolerance calculation.

I 서 론

정보화 시대의 도래와 함께 미세패턴을 사용하는 장비와 부품의 수요가 급증하였으며, 더불어 제작 및 검사장치도 많은 발전을 하였다. 기존의 미세 패턴은 CRT(Cathode Ray Tube), PCB(Printed Circuit Board) 등의 인쇄에 사용하는 것이 고작이었으나 현재는 초고밀도 반도체를 필두로 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel) 등에게까지 확대되었고 선폭도 점점 미세화 되는 경향을 보이고 있다. 반도체의 회로부분은 물론 리드프레임에도 마이크로미터 크기나 이하의 미세 패턴들을 사용하고 있다. 현장에서는 이러한 패턴들을 제작(노광, 와이어 본딩)하거나 검사하기 위하여 각종 광학계를 사용하고 있는데, 측정 및 검사용으로는 현미경 광학계를 주로 사용하고 있다.

이미 발표된 참고논문^[1]에서는 초고속 와이어 본딩(wire-bonding) 장치에 사용하는 기존의 고정 배율 현미경 광학계를 개선하여 반도체 칩의 미세패턴과 리드프레임의 패턴을 연결시키는 장치에서 패턴의 형상 및 본딩(bonding) 과정을

동시에 검사하는 다중배치 현미경 광학계를 새로이 구성하였다. 여기에서 보통 줌렌즈는 배율 또는 유효초점거리가 연속적으로 변해도 상면이 고정되는 광학계로 정의하는 반면에, 배율, 유효초점거리 또는 기타 광학 변수(예를 들면, 곡률, 두께, decenter 또는 tilt 등)가 연속적으로 변하면서 상면이 고정되지 않는 경우는 다중배치계(multi-configurative system)라고 한다. 본 광학계에서는 동일한 대물부를 사용하여 물체를 관측하되, 광분할 프리즘으로 빛을 분할하여 각각의 결상부를 통해 저배율과 고배율을 각각의 CCD로 관측한다. 본딩하려는 물체의 중심부는 고배율로 고정시켜서 관측하고, 저배율로 관측하는 물체의 주변부는 물체의 중심부에 대해 단차 때문에 물체거리가 변하게 된다. 이 경우 저배율 쪽은 배율이 변한다. 이러한 시스템에서 CCD의 영상을 획득하여 와이어 본딩 상태를 자동 감지한다. 이 때 물체의 단차에 관계없이 배율을 고정시켜야만 영상 처리에 매우 유리하여 고속으로 와이어 본딩 상태를 자동으로 검사할 수 있다. 한편 반도체 칩이 장착되는 부분이 진동이 심하여 장착 위치에 변화가 있으므로 고배율 영역의 초점조절을 위해 1군에 초점조절용 렌즈를 첨가해야 한다.

그림 1은 IC 칩과 회로 기판을 연결하는 모습을 나타낸 것

[†] E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

이고, IC 칩의 장착 위치가 장착 기준면에서 (a)약간 아래에 장착된 경우, (b)일치한 경우, (c)약간 위에 장착된 경우를 나타낸다. 그림 1에서 보는 것처럼 도선은 위아래의 높이 차이가 있으므로 광학계의 첫 면을 기준으로 보면 도선의 윗부분과 아래 부분을 관찰할 때, 물체거리가 달라지므로 전통적인 현미경 광학계에서는 이에 따른 배율 차이가 발생한다. 이러한 현미경 광학계는 줌 광학계와 매우 유사한 방법으로 가우스 괄호법(Gaussian bracket)을 이용한 굴절능 배치방법^[1]과 등가렌즈 변환법^[2-4]으로 설계하기도 한다.^[5]

이러한 광학계를 포함하여 제작하고자하는 모든 광학계에 높은 공차를 요구하면 설계된 성능을 얻을 수 있으나, 렌즈 또는 기구물 제작에 있어서 작업 조건이 까다로워져서 렌즈의 단품과 기구물 제작 단계에서의 불량률 및 생산단가가 높아진다. 반대로 렌즈와 기구물 제작을 쉽게 하고자 낮은 공차를 주면 생산된 렌즈 또는 기구물 중에 양품을 선별하여 조립해야만 제품의 성능을 보장할 수 있다. 그러나 이 방법도 많은 렌즈를 제작해야 하고 이중 양품을 선별하여야하는 수고가 따르게 될 뿐더러 양품인 렌즈를 얻지 못할 경우 기구물을 수정해야 할 수도 있다. 그러므로 이 역시 경제적으로 결코 좋은 방법이 될 수 없다. 이때 최소비용으로 원하는 결상 성능을 갖게 하기 위해서는 지나치게 높은 공차를 요구하지 않으면서도 광학계가 원하는 성능을 갖게 하려면 공차분석

이 반드시 뒤따라야 한다.

본 논문에서는 이와 같이 물체의 장착 위치에 따라 초점 조절이 가능하고, 물체의 단차에 관계없이 일정한 배율로 관측하는 반도체 와이어 본딩 검사용 다중배치 현미경 광학계의 설계 시 각 부분들의 설계 공차에 대하여 논의하고자 한다.

II. 광학계의 구조 및 결상성능

본 광학계의 설계 사양은 표 1과 같고, 이를 고려하여 설계한 광학계는 참고문헌 [5]에서 발표한 것과 같지만, 본 논문에서는 6배 고정초점 광학계와 2배의 다중배치 현미경 광학계의 위치를 서로 바꾸어 그림 2처럼 광로도를 구성했다. 이렇게 한 이유는 그림 2에서 보는 것처럼 물체에서 반사한 빛은 펜타프리즘과 삼각프리즘 사이의 광속분할기를 통과할 때, 필연적으로 빛의 손실이 생긴다. 따라서 고배율 광학계의 경우 상측 수치개구(NA : numerical aperture)가 작아서 상측 광량이 낮아지는 문제가 생긴다. 그러므로 고배율 광학계는 광속분할기를 한 번만 거치도록 물체와 가까운 쪽에 구성하고, 배율이 낮은 2배 다중배치 광학계는 그 위쪽에 오도록 설계를 하였다.

그림 2와 같이 물체에 반사한 빛은 첫 번째 프리즘부에서 일부가 반사하여 6배 고정초점광학계로 입사하기 때문에 이

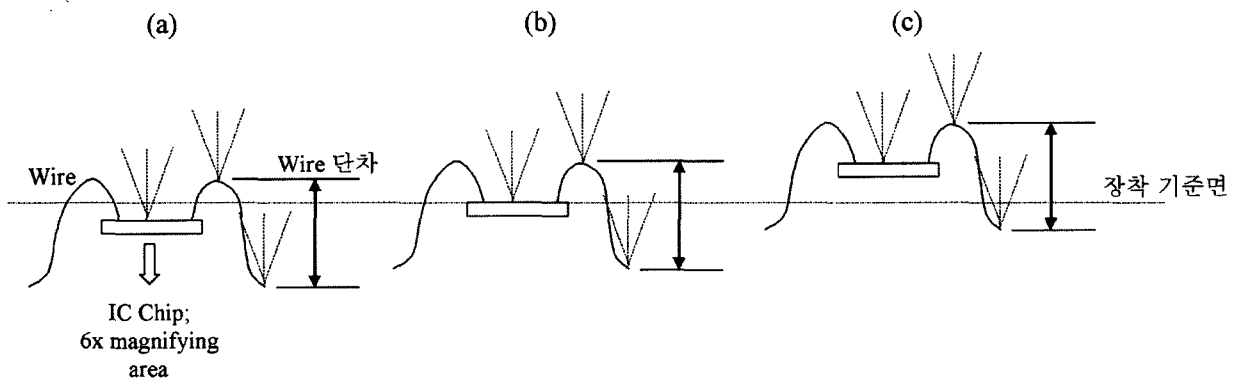


그림 1. IC 칩과 기판의 연결 상태 및 IC 칩의 장착위치 변화((a)장착기준면보다 아래, (b)장착기준면과 일치, (c)장착기준면보다 위).

표 1. 반도체 부품조립 검사용 다중배치 현미경 광학계의 설계사양들.

항목	사양	비고
물체거리	40 mm 이상	
관측 면적	3.15 mm × 2.25 mm	2배
	1.05 mm × 0.75 mm	6배
관측 회로 선폭	100 lp/mm	2배
	200 lp/mm	6배
CCD 사양	전체 크기 : 6.4 mm × 4.8 mm(1/2 inch)	CS3720 (TELI 사)
	화소 크기 : 9 μm	
대물렌즈 편측 두께	7 mm 이하	
물체 단차	± 3.0 mm	
물체측 NA	0.095	

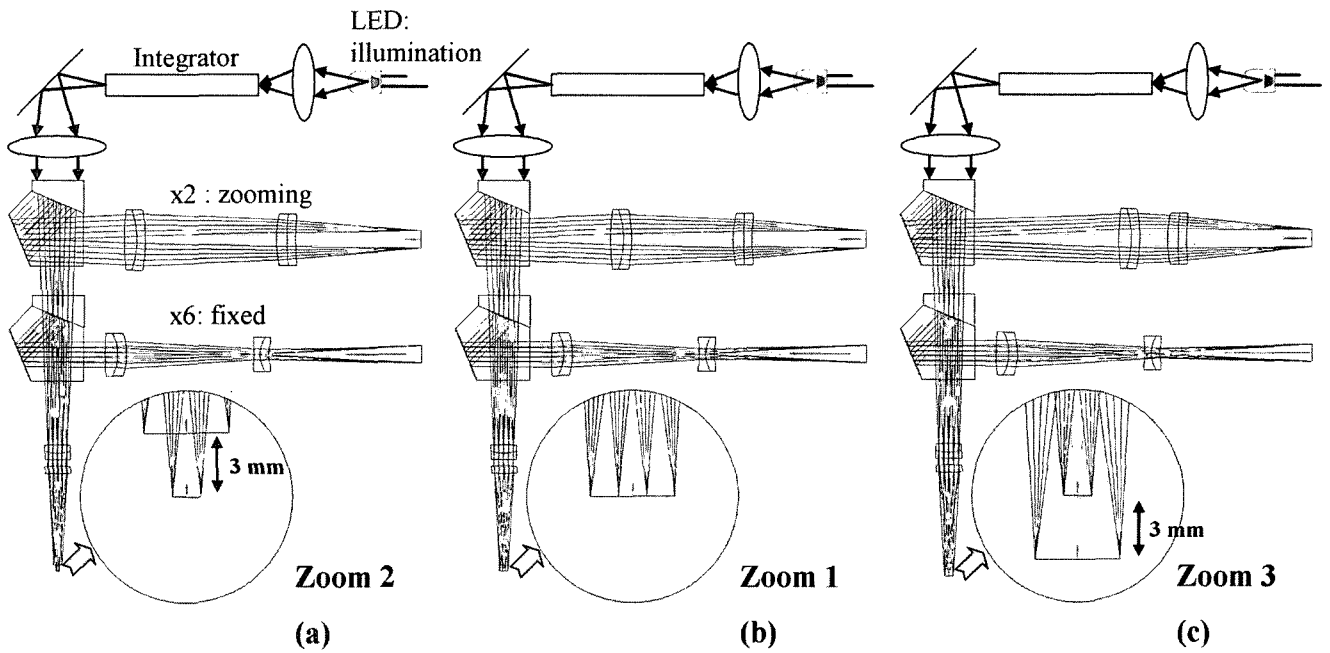


그림 2. 최적화된 광학계의 광로도 및 구조도.

로부터 IC(integrated circuit)의 회로부분을 관찰하고, 두 번째 프리즘에서 반사한 빛은 2배로 배율이 고정된 광학계로 입사하여 IC와 회로기판을 연결하는 도선을 관찰한다. 그림 2(a)는 도선이 IC칩 면보다 아래에 있는 경우이고, (b)는 도선과 IC칩 면의 높이가 같은 경우이며, (c)는 도선이 IC칩 면보다 위에 있는 경우로 큰 원 속에서 확대된 광로도도 이를 확인할 수 있다. 이때 도선의 단차에 따라 2군 및 3군이 비선형 궤적으로 이동하여 물체거리의 변화에 따른 배율변화를 막아서 도선의 높이에 관계없이 항상 2배로 결상하게 한다. 이 광학계의 물체측 NA는 약 0.1이며, 6배 광학계의 상측 NA가 2배 고정배율 광학계의 상측 NA보다 작다. 이때 두 광학계에 같은 광량의 빛이 입사한다면 6배 광학계가 어두워질 것이므로 프리즘부의 광속분할 과정에서 일어나는 필연적인 손실을 감안한다면 그림 2처럼 6배 광학계가 아래 쪽으로, 2배 고정배율 광학계가 위쪽으로 구성되는 것이 유리하다. 한편 기판 자체가 일반적으로 불투명하므로 기판 아래에서 조명하는 배면조명방식은 불가능하고, 측면조명방식은 도선검사장비의 작업공간 확보를 위해 사용자에게 의해 제한된다. 따라서 본 광학계의 조명방식은 그림 2에서 보듯이 LED(light emitting diode)를 광원으로 사용하여 렌즈와 광의 단면에서의 밝기를 균일하게 하는 유리막대형 integrator를 사용하여 1군 대물렌즈 및 두 개의 프리즘부와 동축으로 구성해야만 한다.

그림 3은 2배 광학계의 1군을 확대한 것이다. 1군은 다시 2개의 렌즈 군으로 구성되어 있는데, 1군 첫 번째 렌즈의 유효초점거리는 물체거리와 같으므로 물체에서 나온 빛을 평행광으로 만들어 준다. 이 광학계에서 IC 칩이 고속으로 장착되기 때문에 IC 칩의 장착위치가 조금씩 틀릴 수도 있

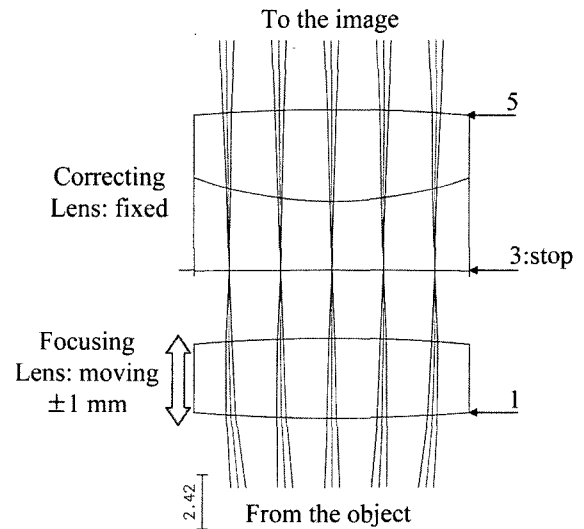


그림 3. 2배 광학계의 1군 렌즈계의 광로도.

고, 제품 자체가 달라져서 IC 회로 부분의 위치가 틀려지기도 한다. 따라서 1군의 초점조절렌즈는 IC 칩의 장착 위치에 따라 ± 1 mm 내에서 조절한다.

그림 4는 2배 광학계의 시야(field)별(즉, 가로축이 물체높이(object height)임) MTF(modulation transfer function) 곡선이다. 가로축((a), (b), (c)의 순서)은 초점조절렌즈의 위치별 MTF 곡선으로서 칩 장착위치가 기준면에서 -1 mm, 0 mm, 1 mm만큼 이동했을 때를 의미한다. 여기서 기준면이라 함은 1군 첫 번째 렌즈의 앞면에서부터 45.93 mm만큼 떨어진 것을 말한다. 그림 4의 세로축((a), (d), (g)의 순서)은 도선단차에 따른 물체 거리로서 각각 42.93 mm, 45.93 mm, 48.93 mm일 때

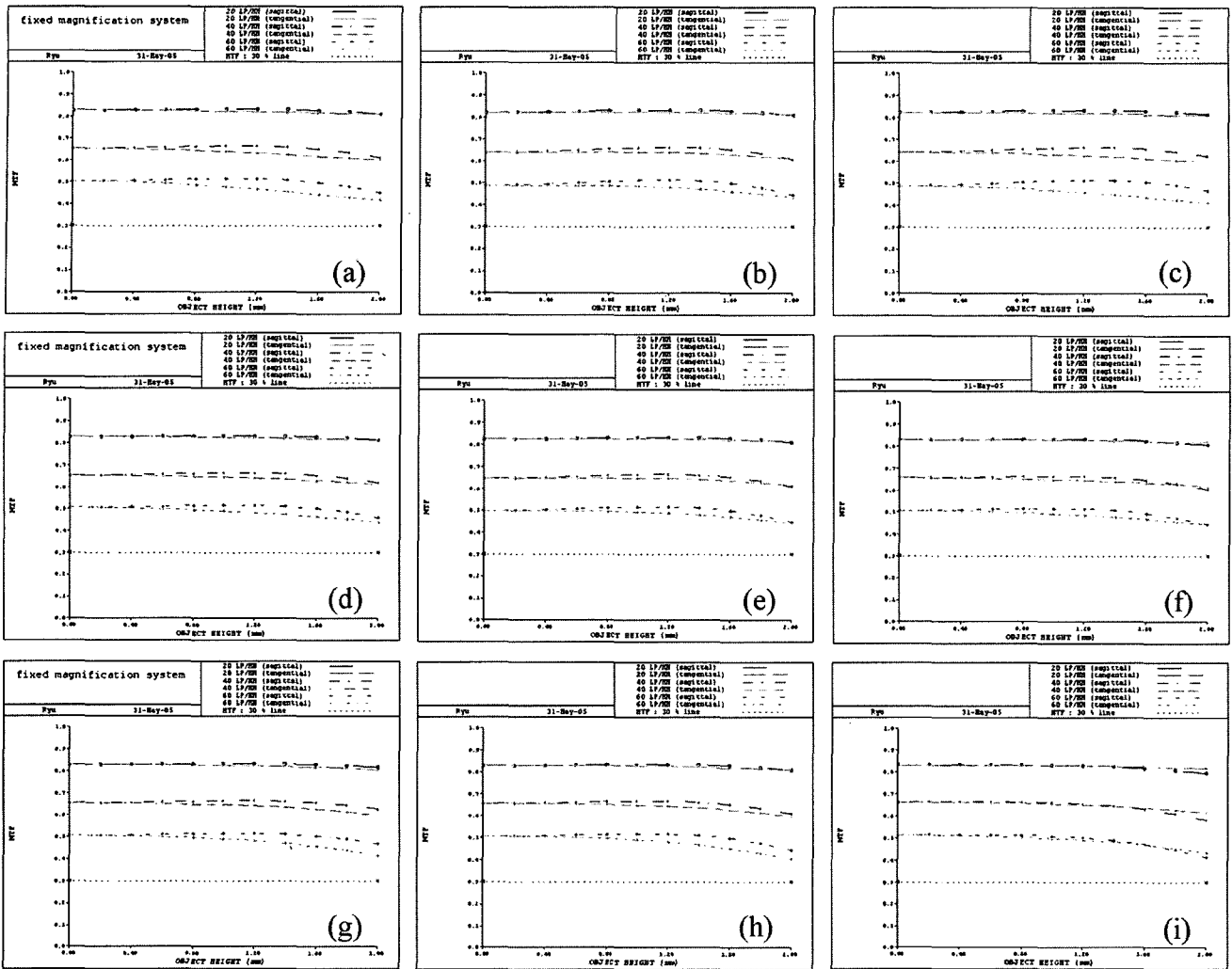


그림 4. 2배 광학계의 시야별 MTF 곡선.

의 MTF 곡선이다. 그리고 각각의 그림들에서 3개의 그래프 군이 나타나는데, 위에서 아래로 각각 20 lp/mm, 40 lp/mm, 60 lp/mm에서 시야별 MTF의 변화를 나타낸다. 그림 4(a)-(i)의 모든 경우에 있어서 CCD(charge-coupled device)의 나이퀴스트(Nyquist) 주파수에 해당하는 공간 주파수인 55 lp/mm에서 MTF가 40% 이상임을 알 수 있다.

그림 5는 IC 회로를 관찰하는 6배 광학계의 공간주파수별 MTF 곡선이다. 그림 5(a)는 칩 장착위치에서부터 기준면이 -1 mm일 때, (b)는 0 mm, (c)는 1 mm이다. 그림 5에서 보는 것처럼 6배 광학계는 회절한계(각 그림의 그래프에서 가장 위에 그린 점선 그래프)에 근접해 있음을 알 수 있다.

III. 결상광학계의 공차분석

최근 개인용 컴퓨터도 계산 속도가 빨라져 MTF를 기반으로 한 각 설계 변수들에 대한 민감도를 쉽게 분석할 수 있으며, 이러한 설계변수들이 한꺼번에 변할 때 결상광학계의 성능분포도 구할 수 있다.

광학계에서 BFL(back focal length)이 변하면 MTF 곡선이 이동함에 따라 성능저하가 있을 수 있으므로 공차가 발생하더라도 BFL 변화가 우선적으로 적은 것이 좋다. BFL에 영향을 주는 공차항목은 곡률, 두께, 굴절률 등이고 decenter와 tilt에 대해서는 근축영역에서 3차 구면수차의 변화가 없으므로^[6] BFL도 변화가 없다. 그런데 굴절률은 제작 단계에서 발생하는 공차가 아니라 재질 구입 단계에서 결정되는 공차항목이므로 BFL의 민감도는 곡률 및 두께에 대한 식으로만 표현한다. 이러한 BFL을 가우스 괄호법^{[7][8]}으로 나타내면 다음과 같다.^[9]

$$EFL = [k_1, \dots, k_i]^{-1}$$

$$BFL = \frac{\left[k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} \right]}{[k_1, \dots, k_i]} = EFL \cdot \left[k_1, \dots, -\frac{d_{i-1}}{n_{i-1}} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 k_i 는 i 번째 면의 굴절능이고, d_i 는 i 번째 면의 두께이며, n_i 는 i 번째 면의 굴절률을 의미한다. 여기에서 가우스 괄호 안에 있는 원소들을 다음과 같이 치환할 수 있다.

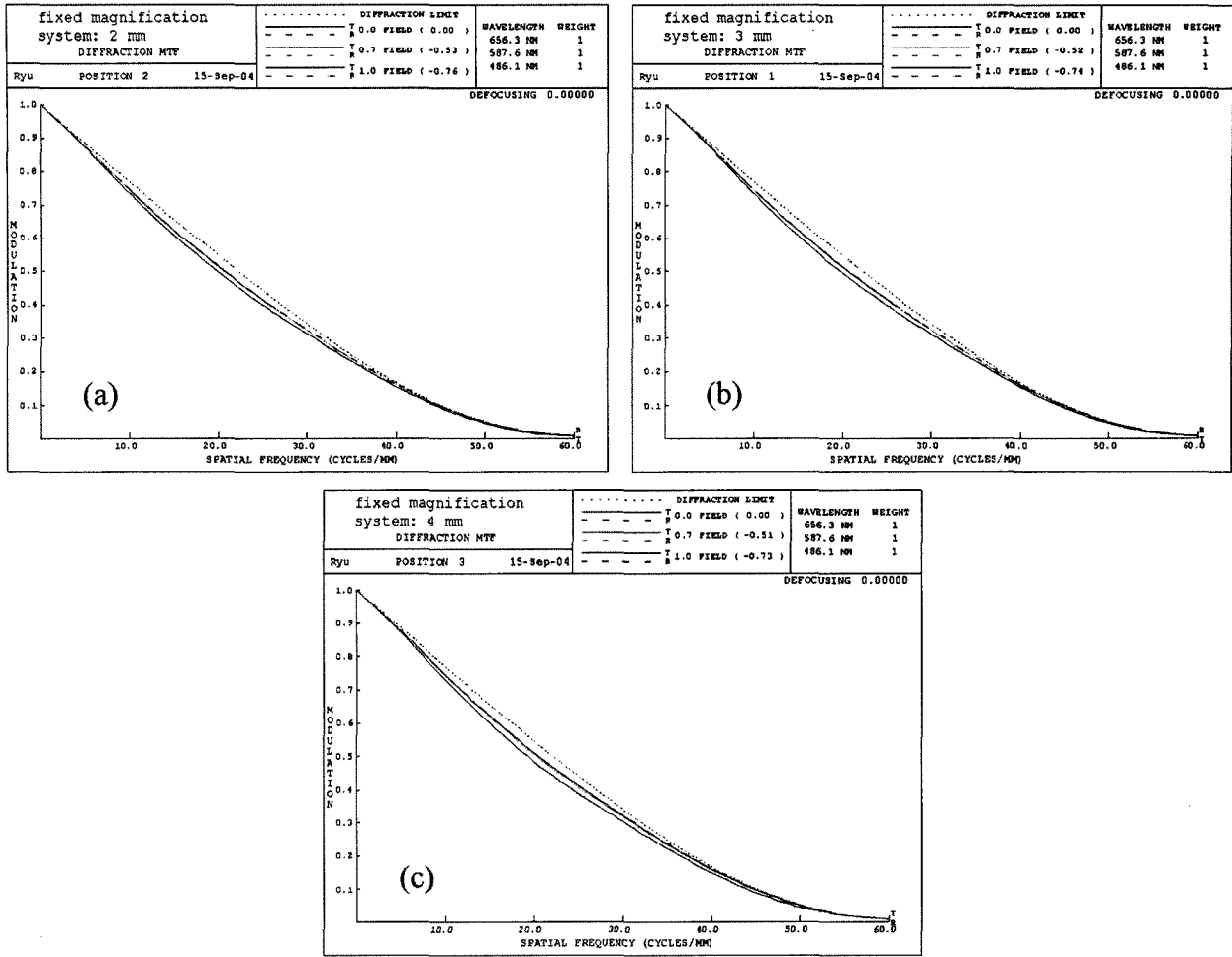


그림 5. 6배 광학계의 초점조절렌즈의 위치에 따른 공간주파수별 MTF 곡선(그림 5의 (a), (b), (c)는 각각 초점조절렌즈의 위치 또는 칩 장착 위치가 -1 mm, 0 mm, 1 mm를 의미한다.)

$$EFL = [a_1, \dots, a_k]^{-1}$$

$$BFL = \frac{[a_1, \dots, a_{k-1}]}{[a_1, \dots, a_k]} \quad (2)$$

여기에서 가우스 괄호 안의 홀수 번째 항은 각 면의 굴절능을 나타내며, 짝수 번째 항은 각 면의 광학적 두께를 의미한다. 만약 광학계가 총 i 면이 있다면 $k=2i-1$ 이 된다. 한편

$$[a_1, \dots, a_k] = [a_1, \dots, a_{j-1}] a_j [a_{j+1}, \dots, a_k] + [a_1, \dots, a_{j-1} + a_{j+1}, \dots, a_k]$$

$$= A_2 a_j + B_1$$

$$A_1 \equiv [a_1, \dots, a_{j-1}] [a_{j+1}, \dots, a_k]$$

$$B_1 \equiv [a_1, \dots, a_{j-1} + a_{j+1}, \dots, a_k] \quad (3)$$

이 성립하고, 같은 방법으로

$$[a_1, \dots, a_{k-1}] = [a_1, \dots, a_{j-1}] a_j [a_{j+1}, \dots, a_{k-1}] + [a_1, \dots, a_{j-1} + a_{j+1}, \dots, a_{k-1}]$$

$$= A_2 a_j + B_2$$

$$A_2 \equiv [a_1, \dots, a_{j-1}] a_j [a_{j+1}, \dots, a_{k-1}]$$

$$B_2 \equiv [a_1, \dots, a_{j-1} + a_{j+1}, \dots, a_{k-1}] \quad (4)$$

이다. 식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 a_j 에 대한 BFL의 미분값을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial BFL}{\partial a_j} = \frac{\partial}{\partial a_j} \left\{ \frac{A_2 a_j + B_2}{A_1 a_j + B_1} \right\} = \frac{A_2}{A_1 a_j + B_1} - \frac{(A_2 a_j + B_2) A_1}{(A_1 a_j + B_1)^2}$$

$$= A_2 EFL - A_1 \cdot BFL \cdot EFL$$

$$= EFL \cdot (A_2 - A_1 \cdot BFL) \quad (5)$$

따라서 l 번째 면의 곡률에 대한 BFL의 미분값은 다음과 같다.

$$\frac{\partial BFL}{\partial c_l} = \frac{\partial BFL}{\partial k_l} \cdot \frac{\partial k_l}{\partial c_l} = \frac{\partial BFL}{\partial a_{l+1}} \cdot \frac{\partial a_{l+1}}{\partial c_l}$$

$$= (n_l - n_{l-1}) \frac{\partial BFL}{\partial a_{l+1}} \quad (6)$$

마찬가지로 l 번째 면의 두께에 대한 BFL의 미분값은 다음과 같다.

$$\frac{\partial BFL}{\partial d_l} = \frac{\partial BFL}{\partial a_{l/2}} \cdot \frac{\partial a_{l/2}}{\partial d_l} = \frac{\partial BFL}{\partial a_{l/2}} \cdot \frac{\partial a_{l/2}}{\partial d_l}$$

$$= -\frac{1}{n_l} \cdot \frac{\partial BFL}{\partial a_{l/2}} \quad (7)$$

그러므로 식 (6)과 식 (7)에 식 (5)을 대입하면 곡률과 두께 변화에 따른 BFL의 미분값을 구할 수 있다. 여기서 역으로 BFL의 변화량이 주어졌을 때, 허용되는 곡률변화와 두께변화는 다음과 같다.

$$\Delta c_i = \left(\frac{\partial BFL}{\partial c_i} \right)^{-1} \Delta BFL$$

$$\Delta d_i = \left(\frac{\partial BFL}{\partial d_i} \right)^{-1} \Delta BFL \quad (8)$$

이렇게 허용되는 곡률 및 두께를 구하는 프로그램은 Code V 내의 내부 언어인 Macro-PLUS로 작성했다. 줌 위치 1(그림 1

```
# in D:\CVUSER\MySeqFiles\col_go 0.13:60
16-Feb-2005
S E N S I T I V I T Y
fixed magnification system(3 mm)
-----
      DELTA   DELTA   IMAGE   DELTA   IMAGE
      FRINGE  CURVATURE  DISTANCE  THICKNESS  DISTANCE
      NOMINAL  53.705241  53.705241
-----
 1  0.868  0.0000199  0.130000  -0.221251  0.130000  0.1300001  6519.390374  -0.562159
 2  0.872  -0.0000199  0.130000  1.060000  0.000401  0.1300001  -6533.488307  0.000401
 3  1.023  0.0002655  0.130000  -0.782398  0.130000  0.1300001  4902.151562  -0.165113
 4  5.000  0.0001168  -0.091779  -0.213010  0.130000  0.1300001  -785.772706  -0.610301
 5  1.541  -0.0000340  0.130000  1.000000  0.000392  0.1300001  -3828.223540  0.000392
 6  5.000  0.0000753  0.073771  1.000000  0.000258  0.1300001  979.166484  0.000258
 7  0.000  0.0000000  0.000000  1.000000  0.000258  0.1300001  0.000000  0.000258
 8  5.000  0.0000508  0.077491  1.000000  0.000392  0.1300001  1524.980767  0.000392
 9  5.000  0.0000426  -0.120034  1.000000  0.000258  0.1300001  -2819.136441  0.000258
10  0.000  0.0000000  0.000000  1.000000  0.000258  0.1300001  0.000000  0.000258
11  0.000  0.0000000  0.000000  1.000000  0.000258  0.1300001  0.000000  0.000258
12  3.407  0.0000160  0.130000  1.000000  0.000392  0.1300001  8139.205199  0.000392
13  2.975  -0.0000117  0.130000  0.522155  0.130000  0.1300001  -11092.402267  0.248968
14  4.188  -0.0000165  0.130000  -0.224301  0.130000  0.1300001  -7892.823764  -0.579577
15  1.753  0.0000066  0.130000  1.000000  0.055062  0.1300001  19658.444929  0.055062
16  3.714  -0.0000174  0.130000  -0.065890  0.130000  0.1300001  -7472.896307  -1.972972
17  5.000  0.0000254  -0.126113  -0.062473  0.130000  0.1300001  -4959.679649  -2.080991
18  5.000  0.0000275  -0.067105  0.130000  0.1300001  0.1300001  -2441.991833
-----
RSS      0.454737      0.348328
-----
CODE >> out n
```

그림 6. 회절 한계에 대한 초점심도만 큼(0.13 mm)의 BFL의 변화량에 따른 곡률과 두께의 허용 공차를 구하기 위한 macro의 실행 예.

표 2. 각 면들에서의 공차항목들 및 각각의 공차범위.

No.	Fringe	곡률 변화	두께	굴절률	Decenter(y)	Tilt(x)	Note
1	0.8	0.1178696	0.05	0.001	0.05	0.05	Group 1
2	0.8	0.0959190	0.1	-	0.05	0.05	
3	1	4.2223709	0.1	0.001	0.10	0.05	
4	2	0.0176462	0.05	0.001	0.03	0.05	
5	1	0.1307323	0.1	-	0.10	0.05	
6	-	-	0.05	-	-	0.05	Penta Prism 1
7	-	-	-	0.001	-	-	
8	-	-	0.05	-	-	-	
9	-	-	0.10	0.001	-	-	Penta Prism 2
10	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	0.1	-	-	0.05	Group 2
13	2.5	0.1621734	0.1	0.001	0.10	0.05	
14	3	0.0240568	0.1	0.001	0.05	0.04	
15	1.5	0.0319645	0.1	-	0.05	0.05	Group 3
16	3.5	0.0572789	0.05	0.001	0.1	0.05	
17	3	0.6843879	0.05	0.001	0.1	0.05	
18	3	0.2822857	-	-	0.1	0.05	

참고)에서 BFL이 회절한계에 의한 초점심도 변화인 0.13 mm 변할 때 곡률공차(DELTA CURVATURE로 표시됨)와 두께 공차(DELTA THICKNESS로 표시됨)에 대한 변화량을 구하기 위해 본 논문에서 작성한 macro를 실행시킨 것이 그림 6이다. 이 그림에서 fringe는 설계 곡률과 실제 제작된 곡률의 차이를 Newton ring으로 환산한 단위이다. 여기서 fringe는 5개로, 두께는 1 mm로 정해진 면은 허용공차가 매우 크기 때문에 인위적으로 허용공차를 제한하였다.

곡률공차 및 두께공차는 기본적으로 식 (1)에서 식 (8)을 계산하여 결정하나, 두께공차는 일반적인 수준을 넘는 것은 0.1 mm로 결정했고, 그 외는 모두 0.05 mm로 결정했다. 굴절률은 원재료 제작사에서 일반적으로 공급하는 수준인 0.001, 각 면의 y-방향 decenter는 0.05 mm, x-방향 tilt는 3분으로 결정하였다. 이때 y-방향 decenter 및 tilt는 MTF 값이 5% 내에 변하는 값을 시행착오에 의한 방법으로 구했다.

공차 항목으로는 각 면의 곡률, 두께, decenter 및 tilt 등으로 설정했고, 줌 위치 1에서 BFL이 초점심도 이내이고 중심 MTF 및 0.8 field MTF가 5% 미만으로 변하는 수준의 각 공차항목들의 변화량은 표 2와 같다. 표 2에서 보는 것처럼 두께에 대해서는 비교적 공차가 둔감함을 알 수 있고, decenter의 경우 4번 면이 민감했고, tilt의 경우 15번 면이 약간 민감하기는 하나 제작이 어려운 수준은 아니다. 다만 1군의 곡률이 민감하며, 특히 초점조절 렌즈의 앞뒷면이 민감하다. 이는 1군의 굴절능이 2군과 3군에 비해 크고, 1군의 굴절능이 초점조절 렌즈에 몰려 있기 때문이다.

표 2에 나와 있는 값으로 각 공차가 주어졌을 때, 축상 MTF

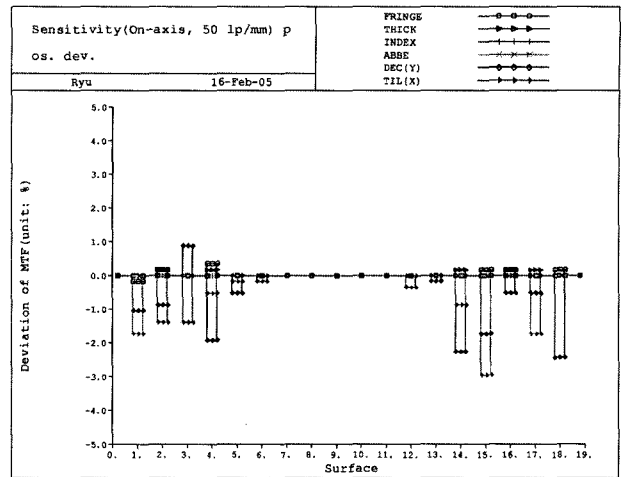
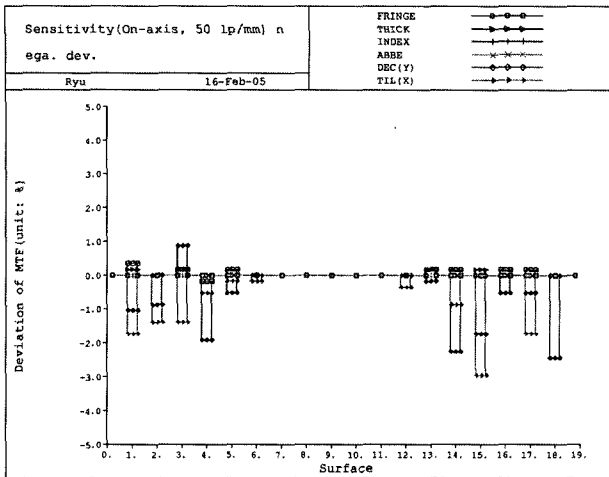


그림 7. 각 공차 항목에 따른 축상 MTF의 변화(그림의 위쪽은 표 2의 공차만큼 음으로 변했을 때의 MTF 변화이고, 아래쪽은 양으로 변했을 때의 MTF 변화임).

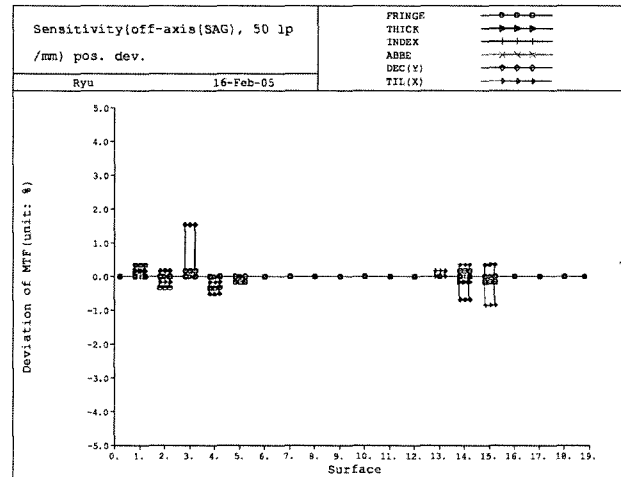
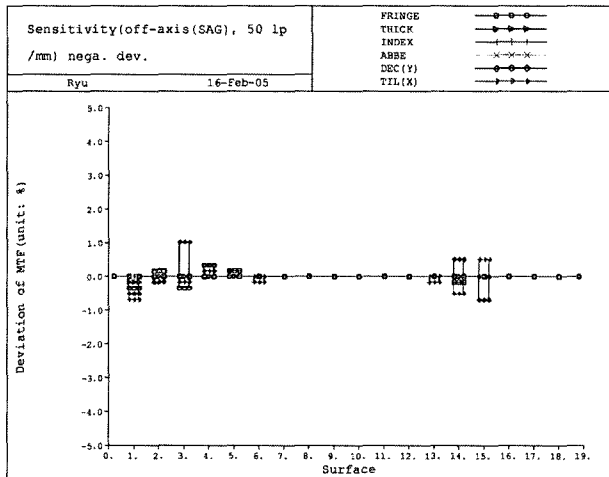


그림 8. 각 공차 항목에 따른 구결면 MTF의 변화(그림의 위쪽은 표 2의 공차만큼 음으로 변했을 때의 MTF 변화이고, 아래쪽은 양으로 변했을 때의 MTF 변화임).

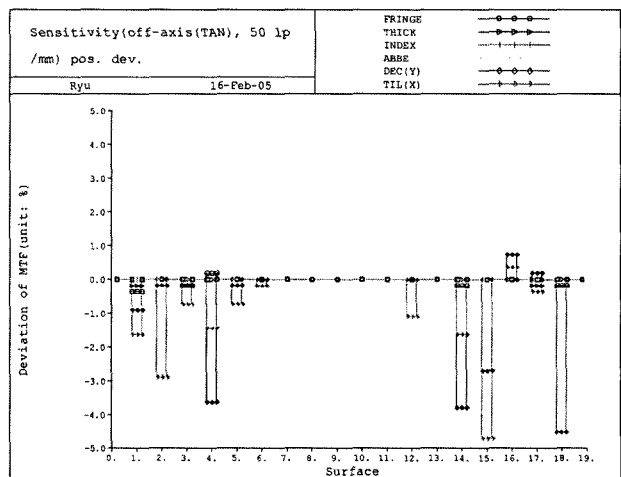
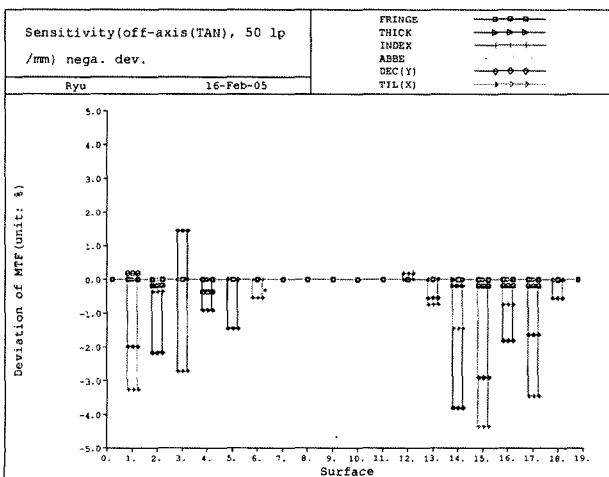


그림 9. 각 공차 항목에 따른 자오면 MTF의 변화(그림의 위쪽은 표 2의 공차만큼 음으로 변했을 때의 MTF 변화이고, 아래쪽은 양으로 변했을 때의 MTF 변화임).

의 변화량은 그림 7이며, 구결면(saggital) MTF의 변화량은 그림 8이고, 자오면(tangential) MTF의 변화량은 그림 9와 같다. 그림 7에서 그림 9까지 각 그림에서 ‘—○—○—’로 표시된 것은 fringe, ‘—▶—▶—▶’로 표시된 것은 두께, ‘—+—+—+’로 표시된 것은 굴절률, ‘—x—x—x’로 표시된 것은 분산 상수, ‘—◇—◇—◇’로 표시된 것은 decenter, ‘—▷—▷—▷’로 표시된 것은 tilt를 의미한다. 각 그림의 위쪽은 표 2의 공차만큼 음으로 변했을 때의 MTF 변화이고, 아래쪽 그림은 양으로 변했을 때의 MTF 변화이다. 그림 7에서 그림 9까지 보는 것처럼 각 공차 항목들의 민감도는 크게 변하지 않으며 가장 심하게 변한 항목은 14번째 면의 decenter로서 면의 정점이 광축에서 0.05 mm가 벗어날 때 MTF 성능이 대략 5% 정도 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 5번째 면의 경우 표에서 주

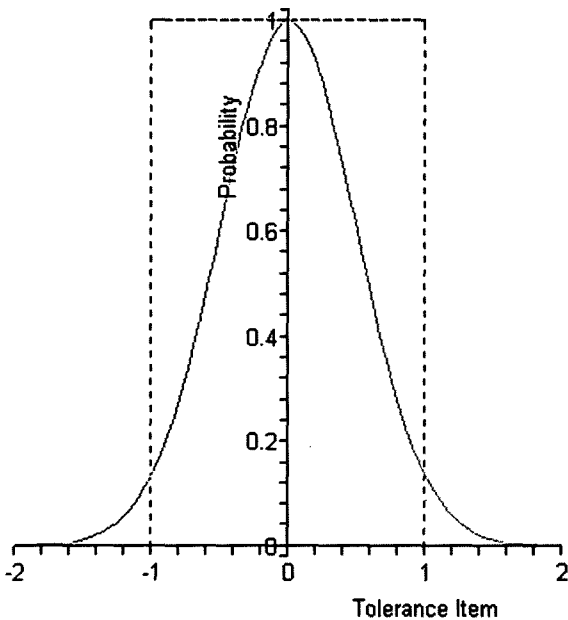


그림 10. 각 공차항목들의 변화에 대한 확률 분포(가로축은 허용공차이고 세로축은 확률을 표현한 것임).

어진 양인 decenter가 0.03 mm보다 더 어긋나면 MTF 변화가 급격해져 5% 이상 변하게 된다. 전반적으로 각 면의 y축 decenter가 비교적 민감하기는 하지만 MTF가 50 lp/mm에서 50% 정도이므로 5% 정도 저하되더라도 광학계의 해상력 성능은 문제가 없을 것으로 판단된다.

표 2와 같은 범위 내에서 공차항목이 가우스 분포로 변할 때와 균일한 분포로 변할 때 광학계의 성능분포를 조사하였다. 각 공차항목 변화에 사용한 가우스 분포는 0이 중간 값이고 표준편차는 표2의 각 공차항목의 절반이 되도록 했다. 그림 10은 각 공차항목들의 변화에 대한 확률 분포를 그린 것으로 가로축은 허용공차이고 세로축은 확률을 표현한 것이다. 예를 들어 1번 면의 두께의 경우, 그림의 가로축에서 1은 0.1 mm를 의미한다.

공차 항목들이 그림 10과 같은 확률 분포를 가지고 임의로 변했을 때 MTF 성능분포도는 그림 11과 같다. 그림 11에서 위쪽은 각 공차항목이 가우스 분포를 가질 때, 아래쪽은 균일한 분포를 가질 때의 성능분포도이다. 이 결과를 얻기 위해 각 공차 항목들이 한꺼번에 주어진 확률분포 내에서 임의로 변하게 하고 각각 100번 반복했으며, 그림 11은 전체광학계의 MTF 변화량을 막대그래프로 그린 것이다.

그림 11에서 구결면 MTF의 성능분포의 최대점이 자오면 MTF의 그것보다 높은 것을 알 수 있다. 파면수차에서 유도된 코마의 ray intersection graph를 그려보면 spot size의 최대 크기가 자오면과 구결면이 3:2인 것을 확인할 수 있다. 즉, 자오면 쪽으로는 flare가 길지만 구결면 쪽으로는 flare가 짧은 것을 의미한다.^{[10][11]} 이러한 이유로 spot size의 크기가 작은 구결면 쪽의 MTF가 자오면 MTF보다 크다고 판단된다.

두 가지의 공차분포확률에 관계없이 MTF 저하가 5% 미만 되는 곳에 가장 많은 확률로 분포한다는 것을 그림 11에서 볼 수 있는데, 이로부터 표 2에서 주어진 공차 내에서 가공 및 조립이 이루어진다면 광학계의 결상 성능에는 큰 문제가 없음을 확인할 수 있다.

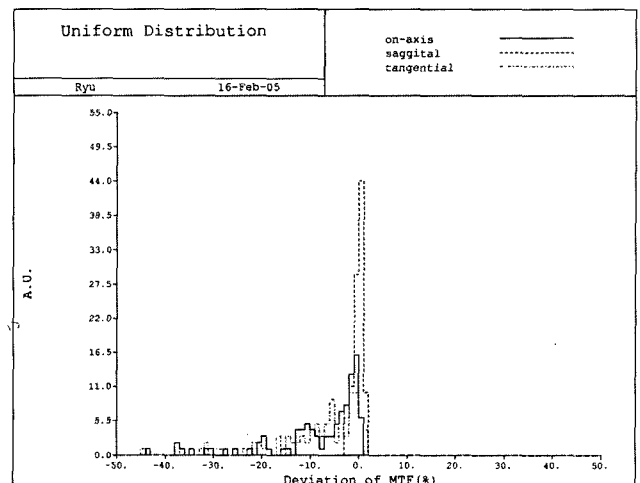
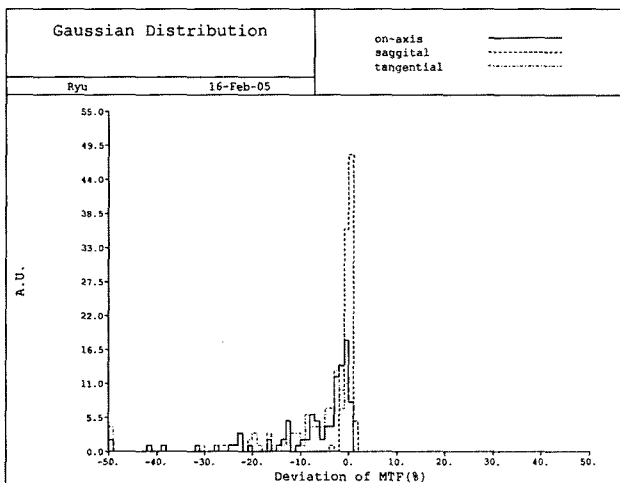


그림 11. 모든 공차 항목이 주어진 확률 분포 내에서 임의로 변할 때 MTF 성능분포

IV. 결 론

참고문헌

가우스 괄호를 이용한 굴절능 배치 방법과 등가렌즈 설계 방법으로 기존에 설계된 반도체 와이어 본딩 검사 장비용 다중배치 현미경 광학계에 대한 공차 분석을 수행하였다. 축상 대칭 공차인 곡률과 두께에 대한 공차는 각 공차 항목이 회절 한계에 의한 초점심도 내에서 BFL이 변화도록 부여했다. 곡률과 두께에 대한 BFL의 변화를 구하기 위해 BFL을 가우스 괄호를 이용하여 표현한 후, 각 면의 곡률 또는 두께에 대한 미분값을 구하여 곡률과 두께에 대한 민감도를 계산하였다. 여기서 굴절률도 축상 대칭 공차에 포함이 되나, 굴절률은 광학계를 제작하는 곳이 아닌 광학 유리 제조 회사에 의해 결정되므로 일반적인 광학 유리의 굴절률 허용값을 그대로 사용하였다. 한편 축 비대칭 공차인 decenter와 tilt는 0.7 field의 공간주파수 50 lp/mm에서의 MTF 변화가 5% 이내가 되도록 시행착오 방법으로 공차를 부여하되 특별히 민감하다고 판단되는 곳은 더 작은 값을 부여하였다. 이렇게 부여한 공차 항목이 모두 한꺼번에 변했을 때 0.7 field의 공간주파수 50 lp/mm에서의 MTF 분포도를 구하였다. 각 공차 항목의 변화에 대한 확률은 가우스 분포와 균일 분포를 갖도록 하였다.

각 공차 항목을 주어진 확률 분포 함수에 따라 모든 항목을 변화시켜 100번을 수행하여 0.7 field의 공간주파수 50 lp/mm에서의 MTF 분포도를 구해본 결과, 구결면 MTF는 분포 범위가 매우 좁았다. 그러나 축상 및 자오면 MTF는 구결면 MTF에 비해 넓은 범위에 걸쳐 분포함을 알 수 있었다. 하지만 두 개의 공차분포확률에 관계없이 MTF 저하가 5% 미만 되는 곳에 가장 많은 확률로 분포하므로 표 2에서 주어진 공차가 되도록 렌즈 단품 관리를 한다면 반도체 와이어 본딩용 다중배치 현미경 광학계의 원하는 결상 성능을 만족할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음을 알려드립니다.

- [1] 정진호, “줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석,” 경남대학교 박사학위논문(1994).
- [2] 전영세, 김형수, 이종웅, 박성찬, “등가렌즈를 이용한 2매 접합렌즈계의 설계,” 한국광학회지, 제9권 5호, pp. 282-289, 1998.
- [3] 이종웅, 김건수, “등가렌즈 변환의 일반화와 일반화된 등가렌즈의 3차수차식,” 한국광학회지, 제7권 4호, pp. 305-313, 1996.
- [4] 이종웅, 박성찬, “렌즈군의 일반화된 등가렌즈 변환,” 한국광학회지, 제9권 4호, pp. 251-257, 1998.
- [5] 류재명, 조재홍, 임천석, 정진호, 전영세, 이강배, “줌 구조를 이용하여 물체거리가 변해도 상면과 배율이 고정되는 현미경 광학계의 설계,” 한국광학회지, 제 14권 6호, pp. 613-622, 2003.
- [6] P. L. Ruben, “Aberrations Arising from Decentrations and Tilts,” JOSA 54(1), pp. 45-52 (1964).
- [7] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics*(Interscience Publisher, New York, 1958), Chap. 9.
- [8] K. Yamaji, *Design of Zoom Lenses*, in *Progress in optics VI*, edited by E. Wolf(North-Holland, Amsterdam, 1971), Chap. 4.
- [9] 정진호, 정해빈, 이상수, “촛점거리, 뒷초점거리, 앞초점거리를 만족하는 근축광학적 렌즈설계,” 새물리 27 (6), pp. 576~582, (1987).
- [10] 高野榮一, *レンズデザインガイド*(寫真工業出版社, 日本, 1996), 2章.
- [11] P. Mouroulis and J. Macdonald, *Geometrical Optics and Optical Design* (Oxford University Press, New York, 1997), Chap. 7.

Tolerance Analysis of Multi-Configurative Microscopic System for Inspecting the Wire-Bonding Status of Semiconductor Chips

Jae Myung Ryu, Jae Bum Kim, and Geon Mo Kang

Optics & Digital Imaging Division, Samsung Techwin Co., LTD, Changwon, 641-716 KOREA

Jin Ho Jung

R&D center, Prooptics. 347-138, Sadong-ri, Deaweol-myun, Icheon-city, Kyonggi-do, 467-850, KOREA

Seung Sun Baek

Dept. of Ocular Optics, Daejeon Health Sciences College2 dong, Daejeon, 300-711, KOREA

Jae Heung Jo[†]

Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, KOREA

[†]*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

(Received January 13, 2006, Revised manuscript March 28, 2006)

We have analyzed various tolerances of the multi-configurative microscopic system for inspecting the wire-bonding of a reed frame by using the Gaussian bracket method and the equivalent lens method. The tolerances for the curvature and the thickness, which are axial symmetric tolerances, are given by varying the back focal length within a focal depth under diffraction-limited conditions. Moreover, by using the trial and error method, the axial non-symmetric tolerances for decenter and tilt are established by assigning the 5% variation of MTF(modulation transfer function) at the spatial frequency of 50 lp/mm and at the field angle of 0.7 field. As the tolerances with the most probable distribution are distributed within the range of the decay rate of less than 5% independent of the probability distribution of tolerances, we can achieve completely the desired design performances of the multi-configurative microscopic system by using the various ranges of these tolerances.

OCIS Codes : 080.3620. 120.4570. 220.3620.