

## 줌 구조를 이용하여 물체거리가 변해도 상면과 배율이 고정되는 현미경 광학계의 설계

류재명<sup>†</sup>

서울광학산업(주) 부설연구소

☎ 369-841 충청북도 음성군 생극면 병암리 68-1번지

조재홍 · 임천석

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공

☎ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

정진호<sup>†</sup> · 전영세 · 이강배

프로옵틱스 연구소

☎ 467-850 경기도 이천시 대월면 사동리 327-138번지

(2003년 7월 25일 받음, 2003년 10월 13일 수정본 받음)

반도체 와이어 본딩(wire-bonding) 조립공정에 사용되는 검사용 다중배치 현미경 광학계를 설계하였다. 2배와 6배에 공통으로 사용되는 대물부를 통과한 광선은 광분할 프리즘으로 둘로 나뉘고 각각의 결상부에 의하여 물체의 주변부는 2배, 물체의 중심부는 6배로 결상하게 한다. 이 때 리드프레임의 와이어 구조 때문에  $\pm 3$  mm의 높이차가 있어서 대물부에서 물체까지의 거리가 서로 다르다. 이러한 단차에 의해 물체거리가 바뀌더라도 동일한 결상 배율로 선명하게 관찰하기 위해 결상부를 기계 보정식 줌 렌즈와 같이 비선형 궤적으로 이동시켜야 한다. 이 궤적을 구하기 위해 가우스 괄호를 사용해 비선형 연립 방정식을 세우고 풀었다. 또한 각 렌즈 군의 굴절능과 군간 간격을 구하는 군별 기초 설계는 등가렌즈에 대한 3차 수차 이론을 사용하였으며, 최종적으로 최적화 기법을 통하여 이러한 현미경 광학계를 얻었다.

주제어 : lens design, equivalent lens, imaging system, microscopic system, multi-configurative system.

### I. 서 론

줌 렌즈는 배율 또는 유효초점거리가 연속적으로 변해도 상면이 고정되는 광학계로 정의된다.<sup>[1]</sup> 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.

정보화 시대의 도래와 함께 미세패턴을 사용하는 장비와 부품의 수요가 급증하였으며, 더불어 제작 및 검사장치도 많은 발전을 하게 되었다. 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) 등에까지 확대되었고 선폭도 점점 미세화 되는 경향을 보이고 있다. 반도체의 회로부분은 물론 리드프레임에도 미세 패턴들이 사용되고 있다. 이러한 패턴들을 제작(노광, 와이어 본딩) 및 검사하기 위하여 각종 광학계가 사용되고 있는데 측정 및 검사용으로는 현미경 광학계가 주로 사용되고 있다. 기존 장치에서는 시판되고 있는 기성품 현미경 렌즈를 조합하여 사용하는 것이 일

반적인 경향으로 좀더 높은 정밀도의 상을 얻거나 특수한 사용 환경에 적합한 요구를 충족시키기에는 역부족이다. 그러므로 높은 정밀도의 광학계를 요구하는 현재 국내 반도체 산업에서는 용도에 맞게 광학계를 별도로 직접 설계 및 제작하여야 한다. 이에 본 논문에서는 초고속 와이어 본딩(wire-bonding) 장치에 사용되는 고정 배율 현미경 광학계를 설계하고자 한다. 이 광학계는 반도체 칩의 미세패턴과 리드프레임의 패턴을 연결시키는 장치에서 패턴의 형상 및 본딩(bonding) 과정을 검사하는데 사용된다. 본 광학계에서는 동일한 대물부를 사용하여 물체를 관측하되, 광분할 프리즘으로 빛을 분할하여 각각의 결상부를 통해 저배율과 고배율을 각각의 CCD로 관측한다. 본딩하려는 물체의 중심부는 고배율로 고정되어 관측하고, 저배율로 관측되는 물체의 주변부는 물체의 중심부에 대해 단차가 있어 물체거리가 변하게 된다. 이 경우 저배율 쪽은 배율이 변하게 된다. 이러한 시스템은 CCD의 영상을 획득하여 와이어 본딩 상태를 자동 감지한다. 이 때 물체의 단차에 관계없이 배율이 고정되어야 영상 처리에 유리하여 고속으로 와이어 본딩 상태를 검사할 수 있다. 저배율에서 물체거리 변화에 따른 배율 변화를 막기 위해 광학계를 telecentric으로 구성할 수 있다. 그러나 물체의 단차가 약  $\pm 3$  mm이므로 이에 따른 초점이동은 막을 수 없다. 또 한 가지 방법으로

<sup>†</sup>E-mail: proopt@kornet.net

1군을 물체에서 발산되는 빛을 평행광으로 만들어서 이를 물체의 단차에 따라 이동하는 것도 생각할 수 있다. 그러나 이런 경우 고배율의 물체거리도 동시에 변하게 된다. 따라서 저배율 결상부를 기계 보정식 줌 렌즈와 같이 구성할 수밖에 없다. 한편 반도체 칩이 장착되는 부분이 진동이 심하여 장착 위치에 변화가 있으므로 고배율 영역의 초점조절을 위해 1군에 초점조절용 렌즈를 첨가해야 한다.

본 연구에서는 이와 같이 물체의 장착 위치에 따라 초점조절이 가능하고, 물체의 단차에 관계없이 일정한 배율로 관측하는 광학계의 설계에 대해 논의하고자 한다.

## II. 광학계의 구조와 설계 조건

### 2.1. 광학계의 구조와 설계 입력 사양

광학계는 그림 1에서 보는 것과 같이 조명부, 대물부, 프리즘부, 결상부 그리고 상면(CCD)으로 구성되어 있다. 조명부는 LED에서 발산되는 빛을 삼각 프리즘과 펜타프리즘을 사용하여 물체(칩 및 리드프레임)를 조명한다. 그리고 펜타프리즘은 광을 분할(2배 및 6배)하고 광로를 변경하는 역할을 담당하며, 결상부는 각각의 배율로 결상하는 역할을 한다. 배율은 2배와 6배로 나누어지는데 6배 결상부는 고정되고, 2배 결상부는 약간의 물체 위치 변화(그림 1의 단차)에 대해 항상 2배의 배율을 얻도록 결상부를 2개의 군으로 나누어 각각의 궤적으로 이동한다. 한편 대물부는 초점조절용 렌즈와 수차보정용 렌즈로 구성된다. 반도체 칩이 항상 같은 곳에 장착되지 않으므로, 이를 초점조절용 렌즈로 물체 거리가 항상 45 mm가 되도록 한다. 따라서 초점조절용 렌즈와 수차보정용 렌즈 사이의 간격은 반도체 칩의 장착 위치에 따라 변할 수 있게 한다. 이러한 조건들을 보다 구체적으로 살펴보면 표 1과 같이 6가지로 설계 입력 사양을 기술할 수 있다.

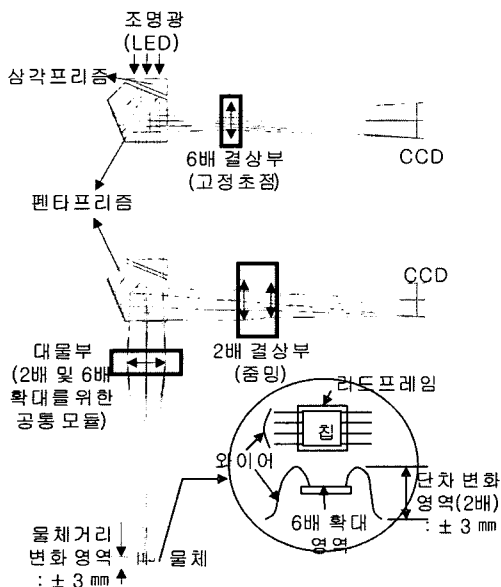


그림 1. 반도체 와이어 본딩 검사용 현미경 광학계의 기본 구조.

표 1. 광학계의 설계 사양

항목	사양	비고
물체거리	45 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) 화소 크기 : 9 μm	CS3720 (TELI 사)
대물렌즈 편측 두께	7 mm 이하	
물체 단차	± 3.0 mm	

### 2.2. 광학계의 구조 설계

이 광학계의 용도와 사용 환경의 특성에 따라 다음 8가지 사항을 고려하여 광학계의 기본적 구조를 설계했다.

1) 본 장치는 고속으로 각 프레임들의 와이어 본딩을 검사해야하므로 최대 9 G( $G \equiv 9.8 \text{ m/s}^2$ )의 가속도로 움직이게 되고, 생산 현장의 환경으로 인하여 광학계의 대물부는 진동의 영향을 많이 받게 된다. 이에 광학계는 진동으로부터 안정된 광학 부품의 배치가 요구된다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서 물체에서 수직으로 올라온 광선의 방향을 CCD가 설치된 수평 방향으로 변경하기 위하여 직각프리즘이나 평면거울보다는 진동에 의하여 부품의 배치가 틀려져도 광로를 항상 90도 방향으로 유지할 수 있는 펜타프리즘을 선택하였다.

2) 대물 고정 렌즈부는 진동에 대하여 안정성을 확보하기 위하여 간격링 등을 사용하여 렌즈를 분리하기보다는 가급적 접합렌즈 또는 단렌즈를 사용하였다. 수차보정용 렌즈는 위치가 고정되지만, 초점조절용 렌즈는 반도체 칩의 장착 위치에 따라 변해야 한다. 또한 진동의 영향이 있으므로 이동을 해야 하는 초점조절용 렌즈는 단렌즈를 사용하기로 한다.

3) 동축 조명을 위하여 45° 광분할 프리즘을 삽입하여야 하나 이 경우 부품의 수가 증가하므로 상기 펜타프리즘의 한 면에 광분할 코팅을 하고, 그 위에 삼각프리즘을 접합하여 프리즘 부분이 조명 및 90° 광로 변화의 이중 역할을 담당하도록 하였다.

4) 와이어 본딩하고자 하는 물체의 단차에 따라 광학계의 물체 거리가 변한다. 이 경우 결상 배율도 함께 변하게 되는 현상을 완벽하게 제거하기 위하여 대물부가 고정되는 대신 결상부를 2개의 군으로 나누어 각각을 비선형 궤적으로 이동시킨다.

5) 본딩용 와이어가 수직인 상태로 공급되어야 하므로 와이어가 대물부에 바짝 붙어야 한다. 이러한 이유로 대물렌즈부의 경통 및 초점조절용 나사 등을 포함한 편측 두께가 7 mm 이하로 제한되고, 이로 인하여 렌즈의 구경을 10 mm 이내, 즉 편측 두께를 5 mm 이내로 설계할 수밖에 없다.

6) 본딩 작업 시 발생하는 렌즈부 표면의 손상에 대비하여 보호 유리(재질: Fused Silica)를 장착하였으며, 물체거리(보호 유리 전면에서 물체까지의 간격)는 와이어 본딩 공간의 확보를 위하여 45 mm로 제한하였다. 이에 초점조절용 렌즈의 앞 초점거리는 약 45 mm가 되므로, 물체측 NA는 0.1(=4.5/45)이며 상측 NA는 2배에서 0.05, 6배에서 0.0167이 될 것으로

예상된다.

7) CCD의 화소 크기가 9 μm이므로 CCD의 공간 분해능 한계인 나이퀴스트 주파수는 약 55 lp/mm(=1/(2×9×10<sup>-3</sup> mm))임을 알 수 있다. 2배 확대 광학계에서는 관측회로의 선폭이 100 lp/mm이므로 상측에서는 50 lp/mm이 되고, 상측 NA가 0.05이므로 회절한계 MTF 성능<sup>[2]</sup>은 상측의 최소 측정 가능 선폭인 50 lp/mm에서 아래의 식 (1)에 대입하면 약 62%이다. 그러므로 MTF 40% 이상을 유지하기 위해서는 광학계를 회절한계성능보다 다소 떨어지게 설계하여도 문제가 없음을 알 수 있다. 그러나 6배 확대 광학계에서는 관측 회로 선폭이 200 lp/mm이므로 상측에서는 33.3 lp/mm이 되고 상측 NA가 0.0167이므로 회절한계 MTF 성능은 34 lp/mm에서 식 (1)에 의해 약 27%이다. 그러므로 광학계를 회절한계성능에 근접하게 설계하여도 40%에 모자라게 되고 실제 분해가 되더라도 콘트라스트가 나쁘게 됨을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하려면 NA가 더 커져야하고 이를 위해 대물렌즈의 크기가 더 커져야 한다. 그러나 설계입력사양에서 주어진 것과 같이 대물렌즈의 편축 두께를 7 mm 이하로 하기 위해서는 대물렌즈의 유효구경을 10 mm 이상 크게 할 수가 없기 때문에 이러한 것을 감수하여야 할 것으로 생각된다.

$$MTF = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) - \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2} \right\} \quad (1)$$

여기서  $\rho_0 = 2NA/\lambda$ 로서  $\lambda$ 는 입사 중심 파장이다.

### III. 각 군의 굴절능 배치

6배 확대 광학계는 물체의 단차 중심을 확대하도록 고정되므로 일반 고정 초점계와 같다. 그러나 2배 확대 광학계는 물체의 단차에 관계없이 일정한 상면에 항상 2배 결상이 되도록 설계한다. 따라서 초기 설계 방법은 2배 확대 광학계에 대해서만 설명하고자 한다.

그림 2와 같이 물체(크기  $\eta$ )가 세 군( $G_1, G_2, G_3$ )을 거쳐서 상(크기  $\eta'$ )이 형성되는 유한 물점용 3군 줌 렌즈의 기본 식을 가우스 괄호로 나타내면 다음과 같다.<sup>[3,4]</sup>

$$[-fwd_H, k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3, -bwd_H] = 0 \quad (2)$$

$$[-fwd_H, k_1, -z_1, k_2, -z_2, k_3] = \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

여기서  $fwd_H, z_1, z_2, bwd_H$ 는 각각 물체면과 1군( $G_1$ ), 1군( $G_1$ )과 2군( $G_2$ ), 2군과 3군( $G_3$ ) 및 3군과 상면 사이의 거리이다. 또한,  $\beta$ 는 광학계의 배율,  $k_1, k_2, k_3$ 는 각각 1군, 2군, 3군의 굴절능이다. 그리고 그림 2에서 상면 위, 2군, 3군 위의 화살표는 대략적으로 그린 각 군들의 결론적인 줌 궤적이다. 이 광학계에서 1군에서 상면까지의 거리( $T'$ )가 일정해야하는 조건식과 물체면에서 상면까지의 거리( $T$ , total track)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_1 + z_2 + bwd_H &= T' \\ fwd_H + z_1 + z_2 + bwd_H &= T \end{aligned} \quad (4)$$

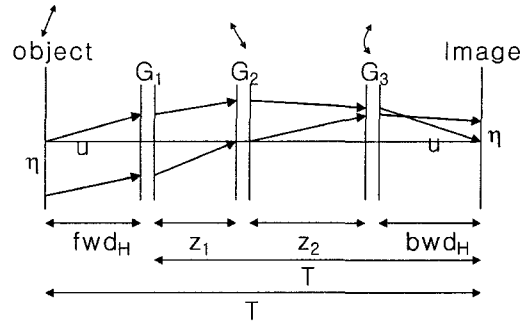


그림 2. 3군 유한 물점용 줌 렌즈계의 기본 형태.

식 (2)에서 가우스 괄호의 성질을 이용하여  $bwd_H$ 를 밖으로 꺼내고, 식 (3)을 대입한 후, 이를 정리하면

$$[-fwd_H, k_1, -z_1, k_2, -z_2] = \frac{bwd_H}{\beta} \quad (5)$$

이다. 같은 방법으로, 식 (3)에서  $k_3$ 를 꺼내고 식 (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$[-fwd_H, k_1, -z_1, k_2] = \frac{1}{\beta} - \frac{bwd_H k_3}{\beta} \quad (6)$$

마찬가지로 식 (5)에서  $-z_2$ 를 꺼내고, 식 (6)을 대입하면 식 (7)과 같다.

$$[-fwd_H, k_1, -z_1] = \frac{bwd_H}{\beta} + \left( \frac{1}{\beta} - \frac{bwd_H k_3}{\beta} \right) z_2 \quad (7)$$

같은 방법으로, 식 (6)에서  $k_2$ 를 꺼내고 식 (7)을 대입하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$-fwd_H k_1 + \frac{z_2 + bwd_H}{\beta} k_2 + \frac{bwd_H k_3 - z_2 bwd_H k_2 k_3}{\beta} = \frac{1}{\beta} - 1 \quad (8)$$

같은 방법으로, 식 (7)에서  $-z_1$ 을 꺼내고,  $z_1$ 을 식 (4)로 소거하면 식 (9)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -fwd_H(z_2 + bwd_H)k_1 - T' + fwd_H T' k_1 + \frac{z_2 bwd_H}{\beta} k_3 \\ = \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) (z_2 + bwd_H) + fwd_H \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에서  $\beta$ 는 배율이며,  $fwd_H$ 는 다시 언급하면 물체 거리로서 광학계 사양에서 이미 주어진 값이다. 이 때  $T', bwd_H$ 는 전체 시스템의 크기로부터 결정한다. 여기서  $fwd_H, z_2, bwd_H$  등은 기준 상점에서 좌우로 두 개의 경계 값이 있다. 따라서 식 (8)과 식 (9)는 각각 2개로 총 4개의 식이 된다. 이 때 미지수는  $k_1, k_2, k_3$ , 그리고  $z_2$ 는 양쪽 경계로부터 두 개의 값이 있으므로 총 미지수는 5개가 된다. 여기서 1군의 굴절능( $k_1$ )의 초기값을 기준 상점에서 물체 거리의 역수로 놓을 수 있다. 그러면 4개의 미지수( $k_2, k_3, z_2, z_2$ )만 남게 되므로 다음과 같은 비선형 연립방정식을 풀면 된다.

$$\begin{aligned}
 & -fwd_{H+}k_1 + \frac{z_{2+} + bwd_{H+}}{\beta}k_2 + \frac{bwd_{H+}k_3 - z_{2+}bwd_{H+}}{\beta}k_2k_3 = \frac{1}{\beta} - 1 \\
 & -fwd_{H+}(z_{2+} + bwd_{H+})k_1 - T' + fwd_{H+}T'k_1 + \frac{z_{2+}bwd_{H+}}{\beta}k_3 \\
 & = \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)(z_{2+} + bwd_{H+}) + fwd_{H+} \\
 & -fwd_{H-}k_1 + \frac{z_{2-} + bwd_{H-}}{\beta}k_2 + \frac{bwd_{H-}k_3 - z_{2-}bwd_{H-}}{\beta}k_2k_3 = \frac{1}{\beta} - 1 \\
 & -fwd_{H-}(z_{2-} + bwd_{H-})k_1 - T' + fwd_{H-}T'k_1 + \frac{z_{2-}bwd_{H-}}{\beta}k_3 \\
 & = \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)(z_{2-} + bwd_{H-}) + fwd_{H-}. \tag{10}
 \end{aligned}$$

식 (10)에서  $fwd_{H+}$ ,  $fwd_{H-}$ ,  $z_{2+}$ ,  $z_{2-}$ ,  $bwd_{H+}$ ,  $bwd_{H-}$  등은 각각 기준 상점 좌우 경계에서 물체 거리, 1군에서 2군까지의 거리, 상점까지의 거리이다. 위 비선형 연립 방정식은 전문 수학 소프트웨어인 Maple 8<sup>5)</sup>을 이용해서 풀었다.

1군은 발산하는 빛을 수렴시키거나 평행광을 만들어 주는 역할을 하므로, 굴절능은 양의 값을 갖는다. 기준 물체 거리에 놓인 물체에서 발산된 광선이 1군 입사 후 평행광이 되도록 하기 위해 1군의 굴절능은 기준 물체 거리의 역수인  $1/48 \text{ mm}^{-1}$ 로 결정했다.  $T'$ 은 285 mm로 정하였고,  $bwd_H$ 는 기구적으로 보아 줌 양단에서 모두 72 mm로 결정하였다. 배율은 -2로 주어졌으므로, 이와 같은 초기값을 식 (10)에 대입하면, 2군 및 3군의 굴절능은 각각  $1/k_2 = 134.649 \text{ mm}$ ,  $1/k_3 = 232.507 \text{ mm}$ 이며, 줌 양단에서 1군과 2군 사이의 거리  $z_{2+}$ 와  $z_{2-}$ 는 각각  $z_{2+} = 5.970 \text{ mm}$ ,  $z_{2-} = 54.732 \text{ mm}$ 와 같이 얻을 수 있다.

#### IV. 줌 궤적

본 광학계에서 줌 궤적은  $fwd_H$ 가 변할 때,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $bwd_H$ 의 값이 된다. 식 (8)과 식 (9)에서  $z_1$ 은 포함되어 있지 않으므로  $bwd_H$ 를 소거하면  $z_2$ 의 궤적을 얻을 수 있고, 반대로  $z_2$ 를 소거하면  $bwd_H$ 의 궤적을 얻을 수 있다. 이 때 아래 식 (11)과 같이  $z_1$ 의 궤적은  $z_2$ 와  $bwd_H$ 의 궤적을 구하여 식 (4)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 bwd_H &= \frac{\frac{1}{\beta} - 1 + fwd_Hk_1 - \frac{z_2}{\beta}k_2}{\frac{1}{\beta}k_2 + \frac{1}{\beta}k_3 - \frac{z_2}{\beta}k_2k_3} \\
 &= \frac{fwd_H + T' - fwd_HT'k_1 + fwd_Hz_2k_1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)z_2}{-fwd_Hk_1 + \frac{z_2}{\beta}k_3 - \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)} \tag{11}
 \end{aligned}$$

식 (11)은 식 (12)와 같이  $z_2$ 에 대한 2차 방정식으로 정리될 수 있다. 여기서 방정식의 계수는 모두  $fwd_H$ 의 함수이다.

$$(A_1A_3 - A_4A_6)z_2^2 + A_2A_3 - A_1A_2 - A_4A_7 - A_5A_6)z_2 - A_2^2 - A_5A_7 = 0 \tag{12}$$

여기서

표 2. 기초 설계된 광학계의 줌 궤적

$fwd_H$	$z_1$	$z_1$	$bwd_H$	배율
45.000	158.268	54.732	72.000	2.000
45.500	161.021	53.352	70.628	2.000
46.000	163.916	51.651	69.433	2.000
46.500	166.965	49.605	68.430	2.000
47.000	170.184	47.181	67.634	2.000
47.500	173.593	44.344	67.063	2.000
48.000	177.219	41.043	66.737	2.000
48.500	181.098	37.220	66.682	2.000
49.000	185.281	32.792	66.927	2.000
49.500	189.836	27.651	67.513	2.000
50.000	194.863	21.642	68.495	2.000
50.500	200.514	14.535	69.951	2.000
51.000	207.030	5.970	72.000	2.000

$$\begin{aligned}
 A_1 &\equiv -\frac{k_2}{\beta}, A_2 \equiv \frac{1}{\beta} - 1 + fwd_Hk_1, A_3 \equiv \frac{k_3}{\beta}, A_4 \equiv -\frac{k_2k_3}{\beta} \\
 A_5 &\equiv -\frac{k_2 + k_3}{\beta}, A_6 \equiv \frac{1}{\beta} - 1 + fwd_Hk_1, A_7 \equiv fwd_H + T' - fwd_HT'k_1
 \end{aligned}$$

이다. 한편  $bwd_H$ 의 궤적을 얻기 위해 같은 방법으로  $z_2$ 를 소거하면  $bwd_H$ 에 대한 식 (13)과 같은 이차방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (B_1B_3 - B_4B_6)bwd_H^2 + (B_2B_3 - B_1B_2 - B_4B_7 - B_5B_6)bwd_H \\
 & - B_2^2 - B_5B_7 = 0 \tag{13}
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 B_1 &\equiv \frac{k_3}{\beta}, B_2 \equiv -\frac{1}{\beta} + 1 - fwd_Hk_1, B_3 \equiv -\left(\frac{k_2}{\beta} + \frac{k_3}{\beta}\right), B_4 \equiv -B_2 \\
 B_5 &\equiv fwd_H(1 - T'k_1) + T', B_6 \equiv -\frac{k_2k_3}{\beta}, B_7 \equiv \frac{k_2}{\beta}
 \end{aligned}$$

이다. 식 (12)와 식 (13)에서  $z_2$ 와  $bwd_H$ 에 대한 궤적을 구했으므로 전술한 바와 같이  $z_1$ 의 궤적은 식 (4)에 따라 다음과 같이 구하면 된다.

$$z_1 = T' - z_2 - bwd_H \tag{14}$$

식 (12), 식 (13), 식 (14)에 따라 계산된 각 군의 궤적( $z_1$ ,  $z_2$ ,  $bwd_H$ )은 표 2와 같다.

표 1에서 나온 각 군의 궤적을 1군의 주요점을 원점으로 기준을 잡았을 때, 2군(—로 표시)과 3군(---로 표시)의 거리를 그리면 그림 3과 같다. 1군과 상면은 고정되어 있으므로 그리지 않았다.

#### V. 각 군의 기초 설계

본 광학계가 진동에 의해 영향을 받으므로 모든 군은 접합 렌즈 또는 단 렌즈를 사용해야 한다. 구면만으로 구성된 얇은 렌즈계에서 조리개가 첫 면인 2매 접합렌즈계의 구면수차( $S_I$ ), 코마( $S_{II}$ ), 비점수차( $S_{III}$ ), 상면만곡( $S_{IV}$ ), 왜곡수차( $S_V$ ), 종색수차( $C_L$ ), 횡색수차( $C_T$ )는 각각 다음과 같다.<sup>16)</sup>

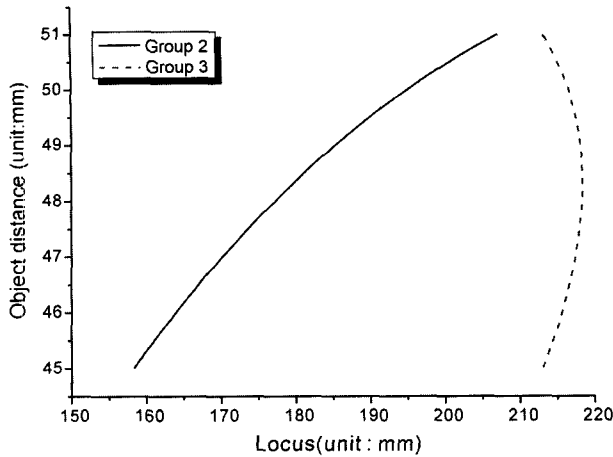


그림 3. 기초 설계된 광학계의 줌 궤적.

$$\begin{aligned}
 u_i = h & \left[ \left\{ \frac{n_0^2 n_1}{(n_0 - n_1)^2} - \frac{n_1 n_2^2}{(n_1 - n_2)^2} \right\} u_1^3 \right. \\
 & + \left\{ \frac{n_1 n_2 (n_1 + 2n_2)}{(n_1 - n_2)^2} u_2 - \frac{n_0 n_1 (2n_0 + n_1)}{(n_1 - n_2)^2} \right\} u_1^2 \\
 & + \left\{ \frac{n_0 n_1 (n_0 + 2n_1)}{(n_1 - n_2)^2} u_0 - \frac{n_1 n_2 (2n_1 + n_1)}{(n_1 - n_2)^2} u_2 \right\} u_1 \\
 & + \left\{ \frac{n_1^2 n_2}{(n_1 - n_2)^2} - \frac{n_2 n_3^2}{(n_2 - n_3)^2} \right\} u_2^2 + \frac{n_2 n_3 (n_2 + 2n_3)}{(n_2 - n_3)^2} u_2^2 u_3 \\
 & \left. - \frac{n_2 n_3 (2n_2 + n_3)}{(n_2 - n_3)^2} u_3^2 u_2 + \frac{n_2^2 n_3}{(n_2 - n_3)^2} u_3^3 - \frac{n_0 n_1^2}{(n_0 - n_1)^2} u_0^3 \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{II} = H & \left[ \left\{ \frac{n_1 (n_2 - n_0)}{(n_0 - n_1)(n_1 - n_2)} u_1^2 - \left( \frac{n_2 + n_1}{n_2 - n_1} u_2 + \frac{n_1 + n_0}{n_1 - n_0} u_0 \right) u_1 \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{n_2 (n_3 - n_1)}{(n_1 - n_2)(n_2 - n_3)} u_2^2 - \frac{n_3 + n_2}{n_3 - n_2} u_2 u_3 + \frac{n_2}{n_3 - n_2} u_3^2 + \frac{n_1}{n_1 - n_0} u_0^2 \right\} \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$S_{III} = \frac{H^2}{h} \left( \frac{u_3}{n_3} - \frac{u_0}{n_0} \right) \quad (17)$$

$$S_{IV} = \frac{H^2}{h} \left\{ \left( \frac{1}{n_0} - \frac{1}{n_2} \right) u_1 + \left( \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_3} \right) u_2 + \frac{u_3}{n_2} - \frac{u_0}{n_1} \right\} \quad (18)$$

$$S_V = \frac{H^3}{h} \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_3^2} \right) \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 C_L = h & \left[ \left\{ \frac{n_0 n_1 (\gamma_1 - \gamma_0)}{n_1 - n_0} - \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{n_2 - n_1} \right\} u_1 \right. \\
 & + \left\{ \frac{n_1 n_2 (\gamma_2 - \gamma_1)}{n_2 - n_1} - \frac{n_2 n_3 (\gamma_3 - \gamma_2)}{n_3 - n_2} \right\} u_2 \\
 & \left. + \frac{n_2 n_3 (\gamma_3 - \gamma_2)}{n_3 - n_2} u_3 - \frac{n_0 n_1 (\gamma_1 - \gamma_0)}{n_1 - n_0} u_0 \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$C_T = H(\gamma_3 - \gamma_0) \quad (21)$$

여기서  $h$ 는 얇은 렌즈계로 입사하는 광선의 높이,  $H$ 는 라그랑지 불변량,  $n_i (i=0, 1, 2, 3)$ 은 각 면에서의 굴절률,  $u_i (i=0, 1, 2, 3)$ 은 각 면에 입사하는 광선의 근축각,  $\gamma = (n_d - 1)/n_d v_d p$ 이다. 위 식에서 비점수치는 매질의 특성과 근축각의 영향을 받지 않고, 물체축과 상축의 근축각에 의해 결정되는 값이다. 또한 왜곡수차와 횡색수차 역시 매질의 특성과 근축각의 영향을 받지 않으며, 물체축과 상축의 매질이 같으면 항상 0이 된다. 각 군에 입사하는 광선의 근축각과 입사각, 출사하는 광선의 근축각, 매질의 굴절률과 분산계수가 주어지면 구면수차, 코마, 종색수차가 최소일 때 각 면의 곡률을 구할 수 있다. 이 때 각 면의 두께를 적당한 값을 주면, 주변 광선의 굴절불변량과 입사 근축각이 유지되는 조건으로부터 두꺼운 렌즈계로 변환이 가능하며 이 방법을 등가렌즈 변환법이라고 한다.<sup>[6-8]</sup> 본 논문에서 2배 확대 광학계에 적용하는 줌 렌즈의 설계에서는 이 방법을 사용하였다.

1군은 초점조절용 렌즈와 수차보정용 렌즈로 나뉜다. 이 때, 굴절능은 초점조절용 렌즈에 배치하고 수차보정용 렌즈는 굴절능 없이 수차 보정만을 담당하도록 한다. 그러나 초점조절용 렌즈는 물체가 장착되는 위치에 따라 움직이므로 단렌즈만으로 구성한다. 이러한 경우 초점조절용 렌즈가 매우 얇다고 가정하면 구면수차가 최소화되도록 곡률을 정할 수 있다. 그러나 잔류 3차 수차는 여전히 존재한다.<sup>[9]</sup> 한편 수차보정용 렌즈는 굴절능이 없으므로, 식 (15), 식 (16), 식 (17), 식 (18), 식 (20)에서  $u_0, u_3$ 는 모두 0이다. 그러나  $u_1$ 과  $u_2$ 를 적당히 조절하면 초점조절용 렌즈의 수차와 상쇄되도록 할 수 있다.

이러한 단렌즈와 접합렌즈가 결합된 광학계의 설계 방법은 얇은 렌즈 근사와 등가렌즈 변환을 사용하여 해석적으로 풀거나,<sup>[10]</sup> 초기설계 단계에서 3차 수차식을 평가 함수(merit function)로 잡아 각 렌즈의 곡률을 결정하는 모듈렌즈 설계<sup>[11]</sup>를 이용할 수 있다. 최근 렌즈 설계 프로그램들이 많은 발전을 하여 내부적으로 3차 수차를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 초점조절용 렌즈의 곡률은 해석적으로 구면수차가 최소화되도록 결정하고, 수차보정용 렌즈의 곡률은 모듈렌즈 설계 방법과 같이 렌즈 설계 프로그램으로 구면수차, 코마, 종색수차를 최소화하여 결정했다.

줌 중심에서 보면 1군은 물체에서 나온 광선이 평행광이 되고, 2군은 평행광이 수렴하는 역할을 한다. 따라서 1군과 2군은 모두 무한 물체에 대한 광학계로 보고 초기 설계를 했다. 1군의 굴절능은 주로 초점조절용 렌즈에 배치했으므로 그 값은 물체거리의 역수가 된다. 초점조절용 렌즈의 재질은 굴절률과 분산값이 큰 Hoya사 TAF1을 사용해 색수차를 최소화하였다. 수차보정용 렌즈의 재질은 E-F2, BSC7을 사용했다.

2군에서 식 (15), 식 (16), 식 (20)에서 초기 입사각  $u_0$ 는 0으로 놓았다. 물체축 NA가 0.05<sup>[12]</sup>이므로, 1군에서 수렴각  $u_3$ 은 0.05이다. 이로부터 2군의 초기해를 구할 수 있으며, 재질은 Hoya사 FC5, NBF10을 사용했다.

3군의 물체는 2군의 상이 된다. 따라서 3군의 물체 거리는 2군의 상 거리에서 2군과 3군까지의 거리를 뺀 값으로 약 -93.605

표 3. 기초 설계된 광학계의 곡률 및 두께

면번호	곡률	두께			재질	비고
		zoom 1	zoom 2	zoom 3		
물체	$\infty$	51.865	48.865	54.865	AIR	
1	35.831		2		TAF1	초점조절용
2	1.038E+03		2~4		AIR	렌즈(1군)
3(STOP)	25.759		3		E-F2	수차보정용
4	9.681		2		BSC7	렌즈(1군)
5	31.161	162.662	143.711	192.473	AIR	
6	202.878		5		FC5	2군
7	-36.346		2		NBFD10	
8	-57.572	45.875	59.564	10.801	AIR	
9	60.654		5		FC5	3군
10	384.047		3		FDS90	
11	174.654	57.077	62.339	62.339	AIR	

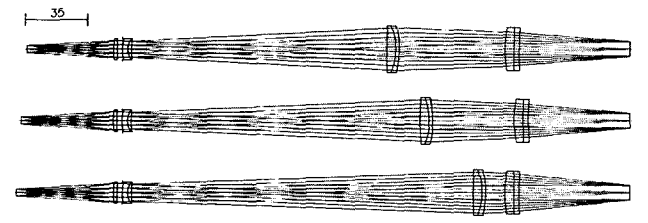


그림 4. 기초 설계된 광학계의 각 줌 위치에 따른 광로도(위부터 차례대로 줌 2, 줌 1, 줌 3).

VI. 최적 설계

최적화 설계를 위하여 렌즈 설계 프로그램인 OSLO(version 6.1, premium edition, Lambda Research Co.)를 사용하였다. 가시광선 영역에서 사용되므로 파장은 486.1 nm, 587.6 nm, 656.3 nm 3개를 잡았으며, 중심 파장은 587.6 nm, 각 파장의 가중치는 모두 1로 정하였다. 구속조건으로는 각 군의 굴절능과 군별 간격은 초기 설계와 일치하도록 했고, 1군 3면(수차보정용 렌즈의 첫 면)에서 상면까지의 거리가 모든 줌 위치에서 같도록 했다. 그 외 배율을 2배로 고정시켰고, 물체거리는 45 mm 이상이 되도록 했다. 줌 위치는 총 3개로 줌 1에서 물체 거리는 48 mm, 줌 2와 줌 3는 각각 45 mm, 51 mm이다. 필드는 0, 0.7, 1.0으로 3개를 주고, 입사동을 향해 총 19개의 광선을 보내서, RMS 빔경이 최소가 되도록 평가 함수를 잡았다. 최적화 과정에서 곡률을 변수로 주었고, 동을 1군 3면에 두었다. 최적화 결과 곡률 및 두께는 표 4와 같고, 광로도는 그림 5와 같다. 광로도 그림에서 위부터 차례대로 각

mm이고, 초점거리는 232.507 mm이므로 상 거리는 약 66.682 mm로서 이 값은 이미 궤적 계산으로부터 얻은 값과 일치한다. 재질은 Hoya사 FC5, FDS90을 사용했다. 이렇게 구한 2배 확대 광학계의 초기 설계값은 표 3과 같다.

표 3과 같은 초기 설계값은 각 군의 주요점 사이의 거리가 반영되었다. 한편, 1군의 그림 4는 표 3에 따른 초기 설계에 대한 광로도로서 위부터 차례대로 줌 2, 줌 1, 줌 3로서 각각의 물체 거리는 45 mm, 48 mm, 51 mm이다.

표 4. 최적화된 광학계의 곡률 및 두께

면번호	곡률	두께			재질	비고
		zoom 1	zoom 2	zoom 3		
물체	$\infty$	43.477	46.477	49.477	AIR	
1	80.716		2		TAF1	초점조절용
2	-65.541		2~4		AIR	렌즈(1군)
3(STOP)	-242.207		2		E-F2	수차보정용
4	18.96		3		BSC7	렌즈(1군)
5	-65.646		50		AIR	
6	$\infty$		25		BSC7	펜타프리즘
7	$\infty$		-20		REFLECT	
8	$\infty$		25		REFLECT	
9	$\infty$	52.969	71.921	101.732	AIR	
10	117.794		5		FC5	
11	-45.601		2		NBFD10	2군
12	-76.563	57.409	43.72	8.646	AIR	
13	53.395		3		FC5	
14	197.374		2		FDS90	3군
15	124.119	64.970	59.708	64.970	AIR	

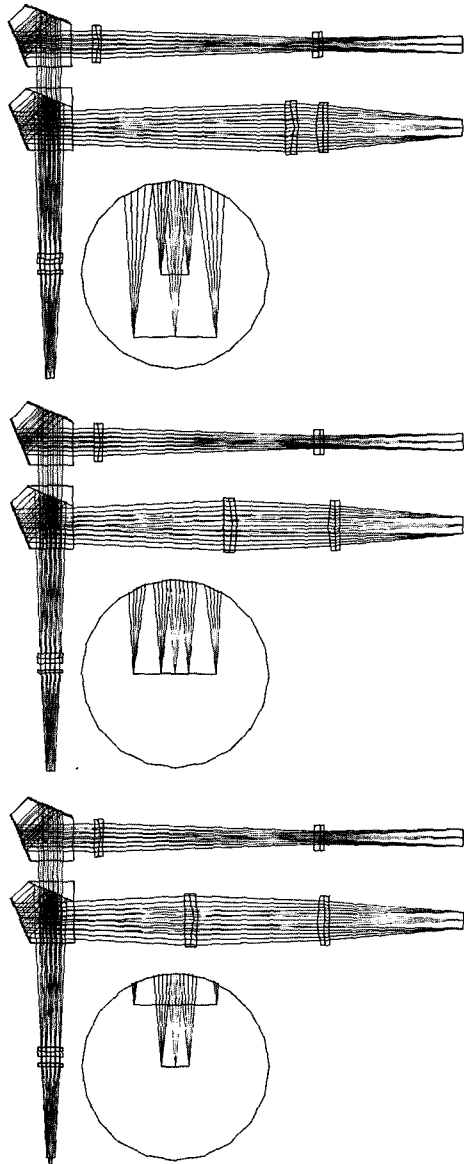


그림 5. 최적화된 광학계에서 각 줌 위치에 대한 광로도(위부터 차례대로 줌 2, 줌 1, 줌 3).

각 줌 2, 줌 1, 줌 3이다.

실제 사용에 있어서 각 배율계의 1군과 2군 사이에 펜타 프리즘이 있으므로, 최적화 단계에서 이를 반영했다. 그림 5에서 보는 것처럼, 6배 광학계에서 물체에서 상까지의 거리는 모든 경우에 대해 일정하다. 그러나 진동에 의해 관찰하려는 리드 프레임의 중심 위치가 달라지므로 1군 첫 번째 렌즈, 즉 초점 조절용 렌즈는  $\pm 1\text{mm}$  내에서 움직인다. 6배 광학계는 고정 초점계이므로 자세한 광학 설계 방법은 생략했다.

그림 6은 6배 광학계의 MTF 곡선이고, 각 그림의 왼쪽 하단의 그래프는 왜곡 수치이다. 그림 6에서 왼쪽 그래프부터 초점 조절용 렌즈에서 수차보정용 렌즈까지의 거리가 각각 2mm, 3mm, 4mm일 때를 의미한다. 그림 6에서 보는 것처럼 6배 광학계는 거의 회절한계까지 설계되었고, 왜곡도 0.1% 이내로 잘 설계되었다.

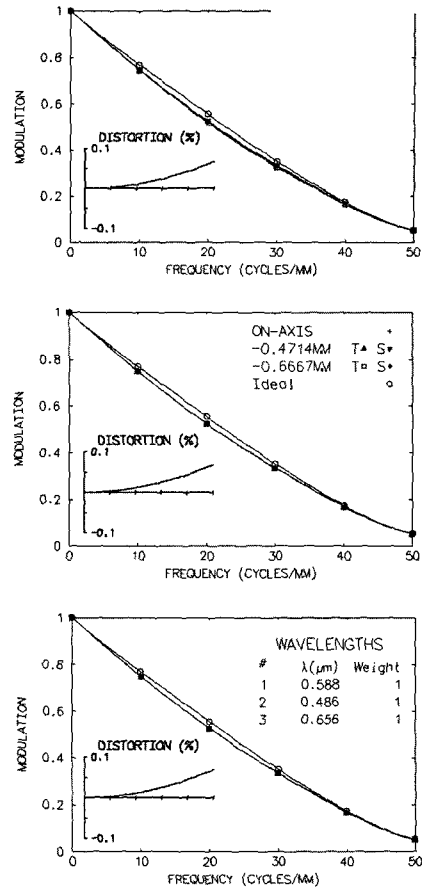


그림 6. 최적화된 6배 광학계의 MTF 및 왜곡 수치.

최적화된 결과의 광로도가 기초 설계의 그것과 비교해 보면, 곡률의 경향이 같다는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 최적화 설계가 기초 설계에 비해 크게 벗어나지 않았음을 알 수 있다. 또한 최적화 단계에서 각 군의 굴절능과 군별 간격이 유지되었으므로 줌 계적은 변하지 않는다.

최적화된 결과의 검증에 위해 MTF를 계산했다. 그림 7은 2배 광학계의 MTF 곡선이고, 각 그림의 왼쪽 하단의 그래프는 왜곡 수치이다. 이 곡선들에서 축상 MTF는 '+'로 표시했고, 0.7 필드에서 자오면 MTF는 '△'로, 0.7 필드에서 구결면 MTF는 '▽', 1.0 필드에서 자오면 MTF는 '□', 1.0 필드에서 구결면 MTF는 '◇'로 표시했다. 각 그림에서 'cfg 1', 'cfg 2', 'cfg 3'는 각각 zoom 1, zoom 2, zoom 3을 의미한다. 각 줌 위치에서 왼쪽, 중심, 오른쪽 그래프는 초점 조절용 렌즈와 수차보정용 렌즈 사이의 거리가 각각 2mm, 3mm, 4mm를 의미한다. MTF 곡선에서 각 줌 위치에서 모두 기본 사양인 50 lp/mm에서 40% 이상 만족하는 것을 확인할 수 있다. 또한 물체가 장착되는 위치에 따라 초점 조절용 렌즈가 움직이는데, 이 때 표 3에서 두 번째 면과 세 번째 면 사이의 거리가 변하게 된다. 모든 경우에서 줌 위치에 상관없이 왜곡이 0.2% 이내로 잘 보장되어 왜곡수치는 문제가 없는 것으로 판단된다.

그림 8은 50 lp/mm에서 본 각 줌 위치에 따른 최적화된 2배 광학계의 through-focus MTF이다. 그림 7의 곡선들은 축상 MTF('+로 표시), 0.7 필드에서 자오면 MTF('△'로 표시),

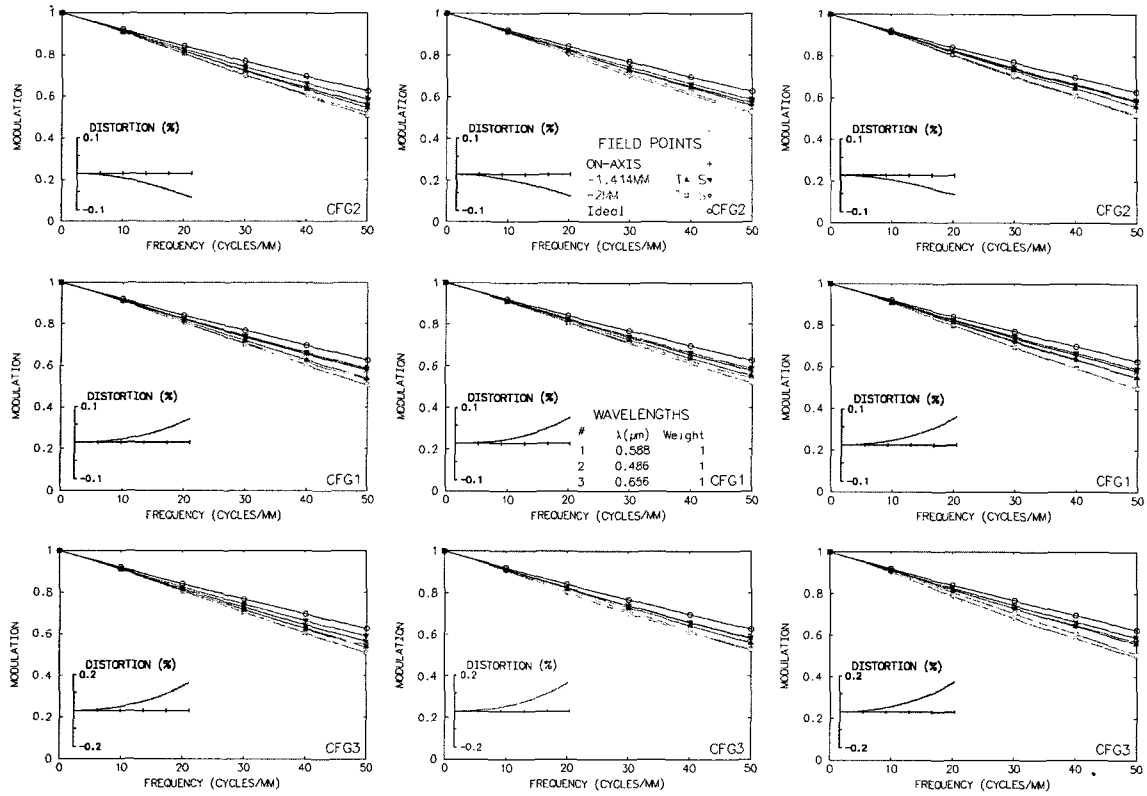


그림 7. 최적화된 2배 광학계에서 각 줌 위치에 따른 MTF 및 왜곡 수차.

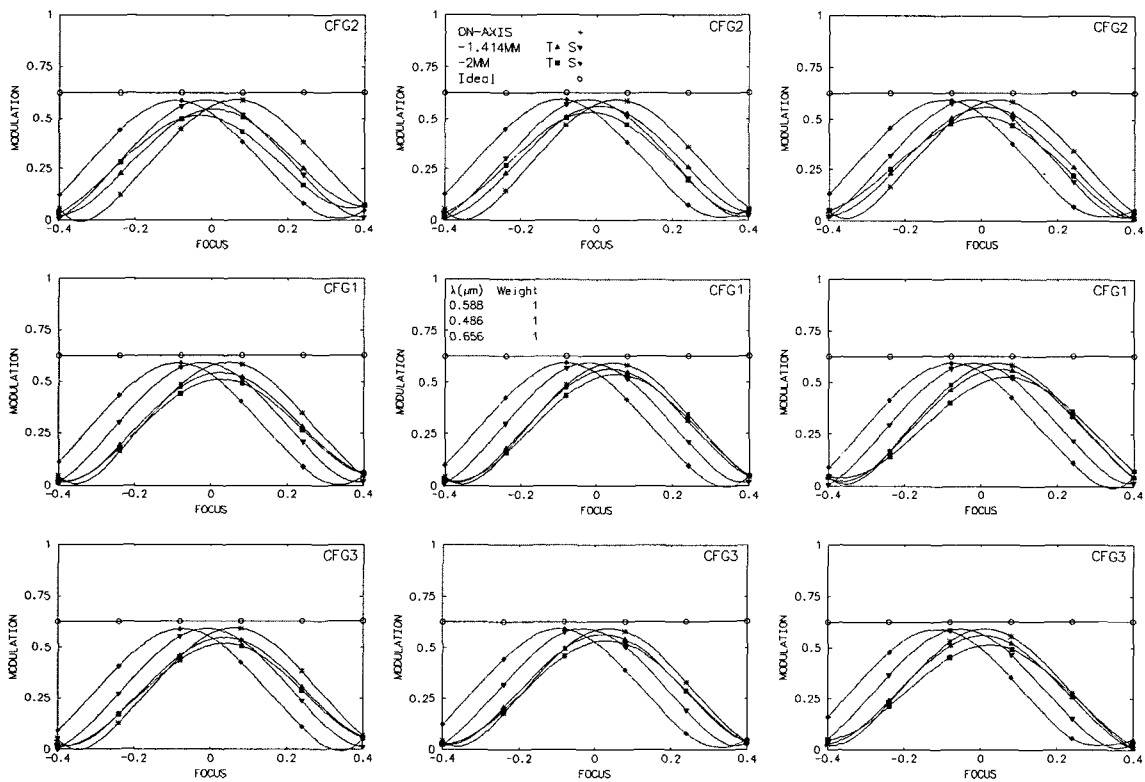


그림 8. 8.50 lp/mm에서 본, 각 줌 위치에 따른 최적화된 2배 광학계의 through-focus MTF.

0.7 필드에서 구결면 MTF(‘▽’로 표시), 1.0 필드에서 자오면 MTF(‘□’로 표시), 1.0 필드에서 구결면 MTF(‘◇’로 표시)를

나타낸 것이다. 그림 8에서 보는 것처럼 약간의 초점미동이 있더라도 광학계의 성능은 유지되는 것을 알 수 있다.



이로서 물체측 NA가 비교적 작고, 배율이 작은 광학계에서 얇은 렌즈 근사와 등가렌즈 변환이 기초 설계법으로 상당히 유용하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 가우시안 팔호를 사용한 군별 굴절능 배치 방법이 이러한 광학계의 기초 설계에 잘 적용되었다.

## VII. 결 론

반도체 와이어 본딩 검사 장비는 물체 거리가 변하더라도 일정한 배율을 가져야 하는데, 본 논문에서는 이러한 현미경 광학계를 줌 방식으로 설계하여 상면을 고정시킬 수 있었다. 각 군의 굴절능을 결정하기 위해 3군 유한 물점용 줌 렌즈 기본식으로부터 비선형 연립 방정식을 유도했다. 미지수들이 1군에서 상면까지의 거리, 3군에서 상면까지의 거리 등은 시스템의 크기 및 기구적인 제한으로부터 결정하였으며, 1군의 굴절능은 물체 거리로부터 결정했다. 이로부터 2군 및 3군의 굴절능과 2군과 3군, 3군과 상면 사이의 거리를 모두 얻을 수 있었다. 그리고 각 군의 굴절능을 결정하고 기초 설계를 하기 위해 얇은 렌즈 근사와 등가렌즈 설계법을 도입하여 각 군별 곡률을 결정할 수 있었다. 이렇게 결정된 기초 설계는 최적화 설계와 비교해 곡률의 경향이 유사한 것으로 보아, 가우스 팔호를 이용한 굴절능 배치, 얇은 렌즈 근사, 등가렌즈 변환을 이용한 기초 설계 방법이 유용하다는 것을 확인했다. 이와 더불어 최적화 설계에서 각 군의 굴절능과 군별 간격을 초기 설계와 같이 유지시켜서 초기 설계의 줌 궤적을 그대로 사용할 수 있었다. 그리고 모든 줌 위치에서 원하는 MTF 값을 만족한 것으로 보아 최적화 설계가 성공적으로 이루어졌음

을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] K. Yamaji, *Design of Zoom Lenses*, in *Progress in optics VI*, edited by E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1971), Chap. 4.
- [2] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill Co., New York, 1996, 2nd ed.), Chap. 6.
- [3] 정진호, “줌 렌즈계의 근축설계와 궤적해석,” 경남대학교 박사학위논문(1994).
- [4] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publisher, New York, 1958), Chap. 9.
- [5] “Maple 8” is a registered trademark of Waterloo Maple Inc. <http://www.mapleapps.com/>.
- [6] 전영세, 김형수, 이종용, 박성찬, “등가렌즈를 이용한 2매 접합렌즈계의 설계,” 한국광학회지, 제 9권 5호, pp. 282-289, 1998.
- [7] 이종용, 김건수, “등가렌즈 변환의 일반화와 일반화된 등가렌즈의 3차수차식,” 한국광학회지, 제 7권 4호, pp. 305-313, 1996.
- [8] 이종용, 박성찬, “렌즈군의 일반화된 등가렌즈 변환,” 한국광학회지, 제 9권 4호, pp. 251-257, 1998.
- [9] 이상수, *기하광학*(교학연구사, 서울, 1995), Chap. 4.
- [10] 문준석, 이종용, 박성찬, “얇은 렌즈 근사를 이용한 Telephoto Lens계의 수차해석,” 한국광학회지, 제 13권 4호, pp. 275-282, 2002.
- [11] 박성찬, 김영식, “렌즈모듈을 이용한 광학계의 설계 I : 줌 렌즈의 First Order 최적설계,” 한국광학회지, 제 8권 2호, pp. 81-87, 1997.

**The design of microscopic system using zoom structure with a fixed magnification  
and the independency on the variation of object distance**

Jae Myung Ryu<sup>†</sup>

*R&D Center, Seoul Optical Ind. Co., LTD, 68-1, Byongam-ri, Saenggeuk-myon,  
Eumsung-goon, Choongcheongbook-do, 369-841 KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: proopt@kornet.net*

Jae Heung Jo and Choen Seog Rim

*Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Taejon 306-791, KOREA*

Jin Ho Jung, Young Se Chun, and Kang Bae Lee

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

(Received July 25, 2003, Revised manuscript October 13, 2003)

The multi-configurative microscopic system for inspecting the wire-bonding of reed frame is designed. Rays refracted by objective lens group which is composed of common lens group of x2 and x6 are splitted by beam-splitter, and Rays through the central region and the boundary region of the object imaged at x2 and x6 through imaging lens groups, respectively. The depth of wire structure on the reed frame has about  $\pm 3$  mm, in order to observe by uniform magnification without the dependency on the variation of objective distance generated by the depth of wire structure on the reed frame, imaging lens groups should be moved on nonlinear locus like mechanically compensated zoom lenses. The nonlinear equations for zoom locus are derived by using the Gaussian bracket. Refraction powers and positions of each groups are numerically determined by solving the equations, and initial design data for each groups is obtained by using Seidel third order aberration theory. The optimization technique is finally utilized to obtain this microscopic system.

OCIS codes : 080.3620, 120.4570, 220.3620.