

1064 nm 레이저 광원용 2~8X 줌 빔 확대기 개발

이명하 · 이동희

울지대학교 보건과학대학 안경광학과

투고일(2008년 4월 7일), 수정일(2008년 5월 13일), 게재확정일(2008년 6월 10일)

목적: 1064 nm용 2.0~8.0X 줌 빔 확대기의 개발. **방법:** 3군 줌 궤적에 대한 초기 설계 값을 신속하게 확보할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이 프로그램과 Sigma 2000 상용프로그램을 활용하여 줌 빔 확대기를 설계 개발한다. **결과:** 3군 줌 궤적에 대한 초기 설계 값을 신속하게 확보할 수 있는 프로그램을 개발하여, 이 프로그램과 상용프로그램 Sigma 2000을 활용하여 2배에서 8배 까지 줌이 가능한 1064 nm용 줌 빔 확대기를 설계 개발하였다. 개발된 줌 빔 확대기는 입사측 유효경이 8 mm이고 출사측 유효경이 32 mm이며 유한광선 수차량이 0.0001 rad 이내인 성능을 갖게 되었다. 전체 시스템의 렌즈 총 길이가 125 mm에서 135 mm 사이가 되도록 제한하였기 때문에 줌 구동의 변화로 인한 전체 경통의 길이 변화는 10 mm 이내로 되었다. **결론:** 3군 줌 궤적에 대한 초기 설계 값을 신속하게 확보할 수 있는 프로그램을 개발하여 2배에서 8배까지 줌이 가능한 1064 nm용 줌 빔 확대기를 설계 개발하였다.

주제어: 1064 nm, 3군 줌, 빔 확대기, 어포칼 시스템

서 론

국내 반도체 광학장비 완성업체에서 생산되어 반도체 후공정 등의 가공에 사용되는 레이저 마킹기의 세계 시장에서의 국산 점유율이 상당히 높은 편이다¹. 그러나 이 제품의 생산에 사용되는 F-Theta 렌즈, galvano mirror 구동장비, 빔 확대기(beam expander), laser 등은 대부분 수입하고 있는 실정이며 아직 국산화율이 저조한 상태이다. 특히 빔 확대기는 레이저에서 출사하는 빔을 원하는 크기로 확대하여 F-Theta 렌즈로 입사시켜 가공 빔 spot을 보다 작게 만들기 위한 부품이다. 1064 nm용 빔 확대기에는 레이저 빔의 직경을 확대 고정하는 고정식과 원가 절감을 위해 하나의 빔 확대기로 여러 단계의 빔 확대 배율을 가질 수 있는 줌 방식이 사용되고 있다. 이러한 여러 종류의 1064 nm용 빔 확대기는 현재 거의 전량 silloptics², Linos³ 등의 국외 회사에서 국내에 수입되고 있는 실정이어서 국산화가 절실한 상황이다.

이에 본 연구에서는 상대적으로 부가가치가 높고 대외적인 기술 경쟁력을 확보할 수 있는 1064 nm용 줌 빔 확대기를 설계 개발하여 레이저 마킹기 부품의 국산화에 보탬이 되고자하는 것이다.

초기 설계의 필요성

설계 개발하고자하는 줌 빔 확대기의 제원(spec)은 표 1과 같다. 이 제원은 참고문헌 2, 3 등을 참고하여 가장 범용으로 사용되어 널리 보급될 수 있도록 결정되었다.

줌 빔 확대기를 설계하기 위해서는 줌 궤적에 대한 초기 설계가 필요한데 초기 설계이론에 대해서는 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다^{4,6}. 그러나 초기 설계치의 경우의 수가 무수히 많기 때문에 하나하나 계산을 하여 주어진 설계 제원에 맞는가를 확인하는 것은 많은 노력과 시간이 요구된다. 따라서 줌 궤적에 대한 초기 설계 값이 요구되는 설계 제원에 일치하는가를 신속하게 확인할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하게 된다.

Table 1. The design specification of the developing zoom beam expander

zoom ratio (x)	2~8
OAL (mm)	125~135
ray aberration (rad)	< 0.0005
effective dia. of 1st lens (mm)	< 8
effective dia. of last lens (mm)	< 32

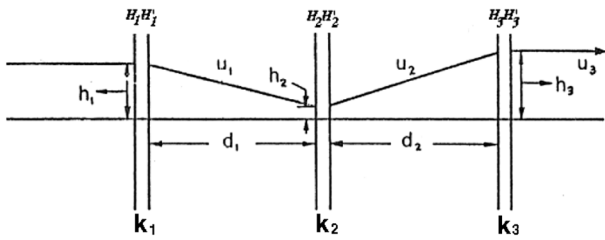


Fig. 1. Gaussian parameters of a 3-component zoom afocal system. (u_0 : initial incidence angle, h_1 : initial incidence height, u_3 : final exit angle, h_3 : final exit height, d_i : distance between each front_and_rear components, k_i : reciprocal of focal length of each component, H_iH_i' : first_and_second principal planes of each component)

3군 줌에 대한 이론⁷과 프로그래밍

일반적으로 3군 줌 어포칼 시스템이 가장 기본적인 형태의 줌 빔 확대기 광학계로 알려져 있다. 이러한 3군 줌 어포칼 시스템 이론을 프로그래밍하기 위해 정리해보면 다음과 같다.

그림 1에서와 같이 3군 줌 어포칼 시스템의 Gaussian parameter를 설정하여 일반적인 근축광선 추적식

$$\begin{aligned} n_i' u_i' - n_i u_i &= k_i' h_i' \quad (\text{or}) \\ n_{i+1} u_{i+1} - n_i u_i &= k_{i+1} h_{i+1} \\ h_{i+1} &= h_i - d_i u_i \quad (\text{or } h_i' = h_i - d_i u_i) \end{aligned}$$

을 적용하면

$$\begin{aligned} u_1 - u_0 &= h_1 k_1 & (1) \\ u_2 - u_1 &= h_2 k_2 & (2) \\ u_3 - u_2 &= h_3 k_3 & (3) \\ h_2 &= h_1 - d_1 u_1 & (4) \\ h_3 &= h_2 - d_2 u_2 & (5) \end{aligned}$$

이 되고, 어포칼 시스템의 배율과 초기조건을 적어보면

$$\begin{aligned} m &= h_3/h_1 & (6) \\ u_0 &= u_3 = 0 & (7) \end{aligned}$$

각 군의 굴절력을 비례상수 를 사용하여 적어보면

$$k_1 = a k_2 = b k_3 \quad (8)$$

(1), (2), (3)식의 양변을 더하여 h_1 으로 나누면

$$k_1 + \frac{k_2 h_2}{h_1} + \frac{k_3 h_3}{h_1} = 0 \quad (9)$$

이 식에 (6), (8) 조건식을 대입하여 양변을 k_1 으로 나누면

$$1 + \frac{h_2}{h_1 a} + \frac{m}{b} = 0 \quad (10)$$

(4), (5)을 더하면

$$h_1 - h_2 = d_1 u_1 + d_2 u_2 \quad (11)$$

(1)식에서 $u_0 = 0$ 이기 때문에

$$u_1 = h_1 k_1 \quad (12)$$

따라서 (4)식에서

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 - d_1 u_1 \\ &= h_1 (1 - d_1 k_1) \end{aligned} \quad (13)$$

이 식을 (2)식에 대입하면

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 + h_2 k_2 \\ &= h_1 k_1 + h_1 (1 - d_1 k_1) k_2 \\ &= h_1 (k_1 + k_2 (1 - d_1 k_1)) \end{aligned} \quad (14)$$

(13)를 (10)에 대입해서 k_1 를 구하면

$$k_1 = \frac{(ab + b + am)}{d_1 b} \quad (15)$$

여기서 d_1 을 구하면

$$d_1 = \frac{(ab + b + am)}{k_1 b} \quad (16)$$

(11)식에 (12), (14), (6)을 대입하고 (8)식을 이용하여 d_2 를 구하면

$$d_2 = \frac{a(d_1 k_1 + m - 1)}{k_1 (d_1 k_1 - a - 1)} \quad (17)$$

이상의 식에서 (16), (17)가 줌 제적을 나타내는 식인데 이 식에 사용되는 변수는 빔 확대기의 출사빔과 입사빔의 비인 어포칼⁸ 시스템의 배율 m , 1군의 굴절능(초점거리의 역수)와 2군의 굴절능 비 a , 1군의 굴절능과 3군의 굴절능 비 b , 1군의 굴절능의 4가지이다. 각 군의 초점거리는 부호가 각각 +, -, +으로 나타나야 하기 때문에 $a < 0, b > 0$ 의 부호를 갖는다.

프로그래밍은 델파이 6.0으로 진행하였다. 델파이에서 제공하는 다양한 컴포넌트를 그림 2와 같이 폼에 적절하게 배치하여 화면에 계산의 결과가 시각적으로 잘 배치되도록 하였다⁹.

개발 목표인 2배에서 8배까지의 줌 비에 대응하기 위해 초기 입력 변수 m 의 범위를 2에서 8까지로 하였다. 나머지 3가지 초기 입력 변수는 결국 각 군의 굴절능을 변수로 하는 것과 같기 때문에 굴절능의 역수인 초점거리를 초기 입력값으로 하여 프로그램 내부에서 변환되어 사용되도록 프로그래밍하였다. $a < 0, b > 0$ 가 되는 여러 가지

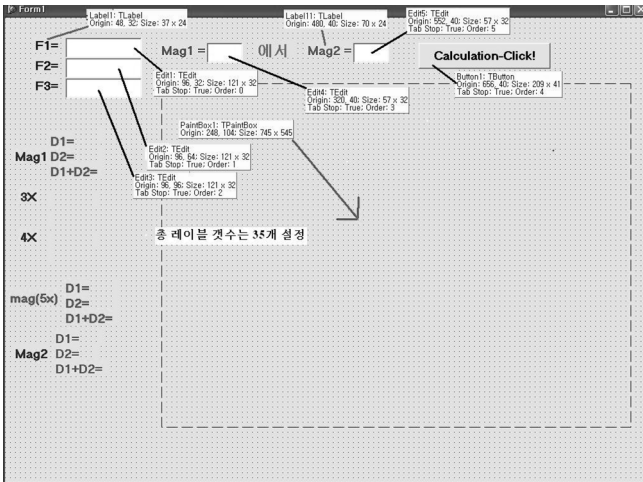


Fig. 2. Configuration of positions of various components on the form_window.

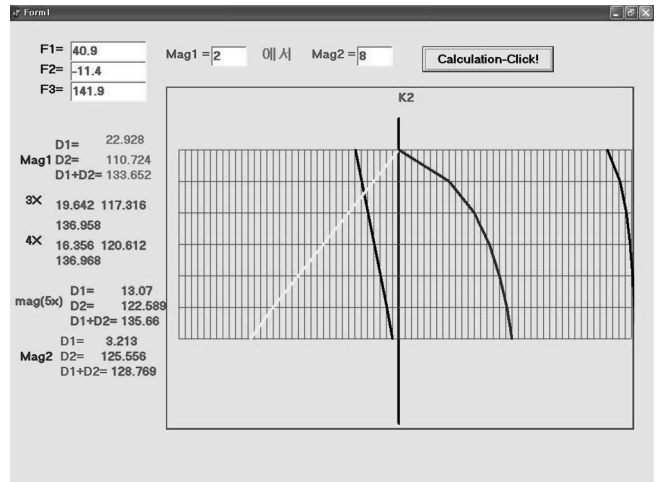


Fig. 4. One example which is able to satisfy demands of the user.

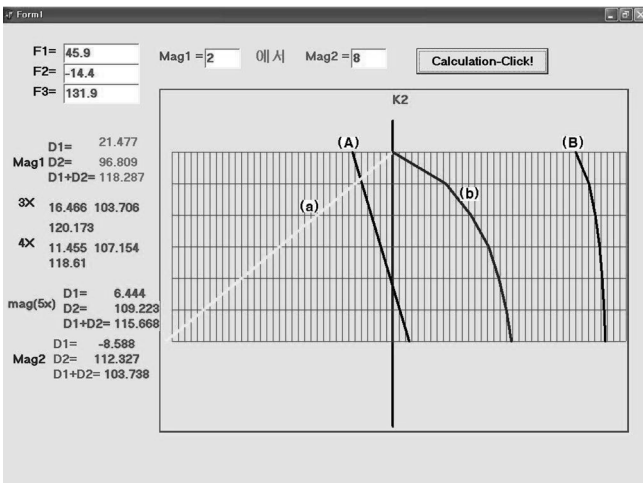


Fig. 3. One example which doesn't satisfy demands of the user.

조합의 각 군의 초점거리를 입력하였을 때, 각군 사이의 거리(d_1, d_2)가 최적인 상태의 해를 선택하게 되는데 이는 그림 3, 4와 같은 프로그래밍 결과의 그래프와 좌측의 계산 값을 보고 선택하게 된다.

프로그래밍 수행 결과의 활용

전체 시스템의 렌즈 총 길이를 125 mm에서 135 mm 사이로 하는 초기 설계 조건을 만족시키기 위해 여러 가지 조합의 각 군의 초점거리를 입력하여 프로그램 수행 결과인 그림 3, 4와 같은 화면으로 상태를 확인하여야 한다. 그림 3, 4의 그래프에서 7개의 수평선은 각각 2배에서 8배까지의 줌 상태의 위치를 볼 수 있도록 한 것이다.

현재 그림 3은 1군의 초점거리 $f_{G1}'=45.9$ mm, 2군의 초점거리 $f_{G2}'=-14.4$ mm, 3군의 초점거리 $f_{G3}'=131.9$ mm

일때의 상태를 나타내는데 2배에서 8배의 줌 구동에서 전체 시스템의 렌즈 총 길이가 103 mm에서 120 mm 정도로 요구 조건을 수용하지 못한다. 그림 3에서 (A) 그래프는 2군을 기준(그래프 중앙 k_2 라인) 1군 렌즈의 이동을 보여 주는데 줌 6배 정도에서 두 군이 교차하여 지나가기 때문에 8배의 줌을 구성할 수 없다는 것을 보여 준다. 따라서 초기의 f_{G1}' , f_{G2}' , f_{G3}' 입력값을 조금씩 변화하여 주어진 요구 조건을 만족하도록 하여야 한다.

(B) 그래프는 2군을 기준으로 3군 렌즈의 이동을 보여 준다. (a)와 (b)는 (A)와 (B)의 상대적인 이동량을 4배 확대하여 중앙 k_2 라인을 기준으로 좌우 방향으로 보여주는데 k_2 라인을 기준으로 왼쪽은 '-', 오른쪽은 '+' 값으로 계산하여 2배에서 8배의 줌 위치에서 서로 합한 양이 2배 줌 일 경우의 전체 시스템의 렌즈 총 길이에서의 상대적인 렌즈 총 길이의 차이를 나타내는 양으로 줌 비에 따르는 상대적인 렌즈 총 길이의 변화를 보여주는 중요한 지표가 된다.

그림 4는 f_{G1}' , f_{G2}' , f_{G3}' 입력값을 조금씩 변화하여 주어진 요구 조건을 만족하도록 한 상태를 보여 주고 있다. 비록 8배 줌 상태에서 1군과 2군사이의 거리가 3.2 mm 정도이지만 1군과 2군을 단렌즈(singlet)로 한다면 허용되는 값으로 판단된다. 결국 우리는 프로그래밍 수행 결과 $f_{G1}'=40.9$ mm, $f_{G2}'=-11.4$ mm, $f_{G3}'=141.9$ mm의 초점거리 조건을 얻을 수 있었다.

최적화 작업¹⁰과 경통 설계

Sigma 2000 프로그램을 사용하여 $f_{G1}'=40.9$ mm, $f_{G2}'=-11.4$ mm, $f_{G3}'=141.9$ mm의 초점거리 조건으로 각 군의 개별 렌즈의 초점거리를 유지하면서 구면수차를 제

Table 2. The optimized design data of the zoom beam expander

WAVELENGTHS [nm]	1064.00	1074.00	1054.00		
#SURF	RADIUS	THICK	INDEX1	CLR RAD	GLASS
1 S	33.411	0.000	1.000000	4.000	
2 S	-52.830	3.000	1.506634	3.894	S-BK7
3SZ1	-15.000	21.333	1.000000	1.865	
3SZ2	-15.000	11.483	1.000000	1.865	
3SZ3	-15.000	1.634	1.000000	1.865	
4S	20.982	1.500	1.754335	1.909	S-SF11
5SZ1	-108.178	95.861	1.000000	14.609	
5SZ2	-108.178	107.736	1.000000	14.609	
5SZ3	-108.178	110.705	1.000000	14.609	
6S	199.428	4.000	1.754335	15.304	S-SF11
7S	Plane	1.310	1.000000	15.512	
8S	-44.801	5.000	1.754335	15.848	S-SF11
9S	Plane	50.000	1.000000	15.849	
10S	Plane	0.000	1.000000	15.849	

	zoom1	zoom2	zoom3
BFL	-129859.02	-150205.09	-156498.68
EFL	-64929.54	-30041.02	-19563.07
FNO	8116.192	7510.256	4890.767
FFL	32653.98	6065.864	2467.422
MAG	0.50000	0.20000	0.12500
IMG ANG	0.00101	0.00040	0.00025

거하도록 각 군의 개별 최적화를 하고 전체 시스템을 구성하여 2배, 5배, 8배의 3군데를 기준으로 줌 최적화를 하였다. 1군과 2군의 유효경은 8 mm 이내이고, 3군은 32 mm 이내를 유지하는 것이 초기 설계 조건이기 때문에 1군과 2군은 1개의 렌즈, 3군은 2개의 렌즈로 구성되어 최적화하였다. 설계에 사용한 초자는 BK7과 SF11로 하였는데, 이는 1064 nm의 레이저를 광원으로 사용하기 때문에 색수차를 고려할 필요가 없다는 점과 현재 구하기 쉽고 초자의 가격이 낮다는 점을 고려하여 선택된 것이다. 표 2와 그림 5에 그 결과가 정리되어 있는데 2배, 5배, 8배의 위치에서 최적화 하였지만 2배에서 8배 사이의 모든 위치에서도 좋은 수차 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6, 7, 8은 각각 2×, 5×, 8×에서의 유한광선 수차를 보여 주고 있으며 0.0001 rad 이내의 수차량으로 잘 제어되고 있음을 보여 주고 있다.

그림 5에서 줌 궤적을 보면 2군의 경통을 기준으로 줌 배율에 따라 1군과 3군의 경통을 돌려서 특정한 거리를 유지 해주면 원하는 줌 배율을 구성할 수 있게 된다. 따라서 경통의 구성을 그림 9와 같이 구성하여 캠 구조가 아

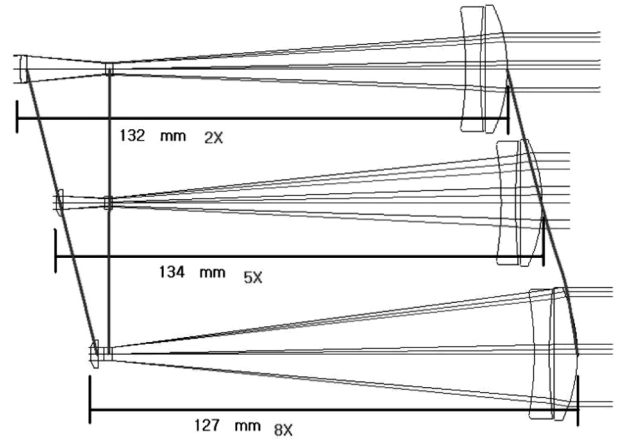


Fig. 5. Configuration of zoom tracks. (the lines which spread from upward to downward show approximate zoom tracks.)

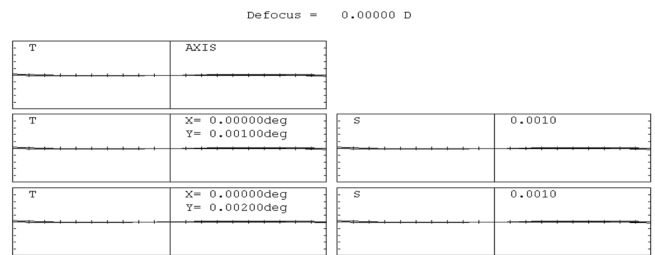


Fig. 6. Finite ray aberrations of the 2× zoom status.

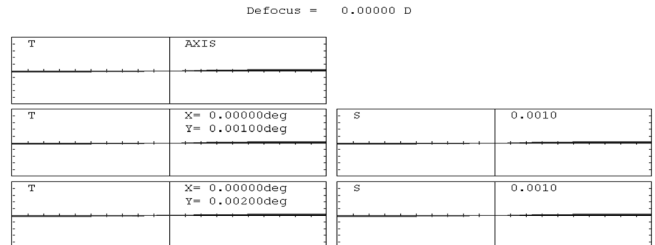


Fig. 7. Finite ray aberrations of the 5× zoom status.

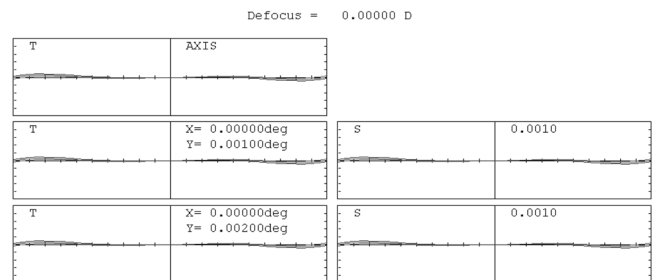


Fig. 8. Finite ray aberrations of the 8× zoom status.

닌 슬라이드 방식의 경통을 구성하여 원가 절감을 하도록 하였다.

결론

본 연구에서 줌 궤적에 대한 초기 설계 값을 신속하게

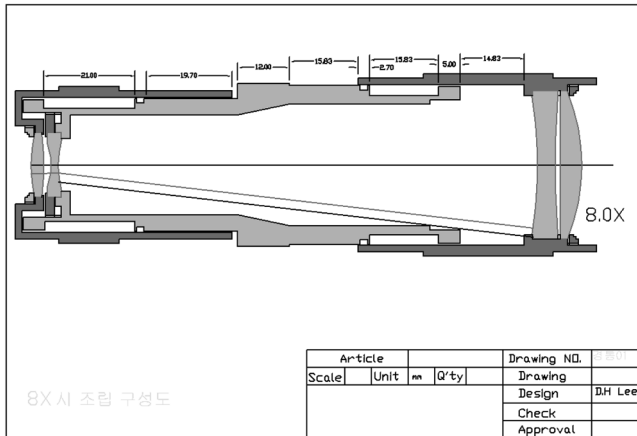


Fig. 9. Barrel drawing of the designed zoom beam expander.



Fig. 10. Appearance features of the designed zoom beam expander.

확보할 수 있는 프로그램을 개발하여 2배에서 8배 까지 줌이 가능한 1064 nm용 줌 빔 확대기를 그림 10에서와 같이 설계 개발하였다.

개발된 줌 빔 확대기는 입사측 유효경이 8 mm이고 출사측 유효경이 32 mm이고 유효광선 수차량이 0.0001 rad 이내인 성능을 갖게 되었다.

전체 시스템의 렌즈 총 길이도 125 mm에서 135 mm 사이가 되도록 하여 줌 구동의 변화로 인한 전체 경통의 길이 변화가 10 mm 이내가 되도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전광(주)이 참여기업으로 참여한 2007년도 경기도 중기청 산학연 컨소시엄 개발 사업 연구비 지원으로 수행되었음을 밝혀둡니다.

참고문헌

1. “비상하는 부품, 소재, 장비)장비-이오테크닉스”, 전자신문, 2005.04.14.
2. <http://www.silloptics.com/downloads/katalog2007screen.pdf> pp. 14-17.
3. http://www.linos.com/pages/mediabase/original/03-Optical_Systems_5614.pdf pp. 90-95.
4. 山路敬三, “ズーム렌즈의光學設計に關する研究”, Canon 研究報告, No. 3(1964).
5. 中川治平, “ズーム렌즈의設計と評價”, トリケップス, w s122, 東京, pp. 11-46(1991).
6. Tanaka, K., “Paraxial Analysis of Mechanically Compensated Zoom Lens 1: 4-Component-type”, Appl. Opt., 21: 2175(1982).
7. 한국광학산업기술연구조합, “AF ZOOM MECHANISM 설계및 제조 기술 개발”, 상공부, pp. 109-117(1990).
8. Freeman, M. H. and Hull, C. C., “Optics”, 7th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, pp. 197-199(2003).
9. 백운기, 양병규, 류기동, 김민식, “Delphi 6 시작 그리고 완성”, 대림, 서울, pp. 301-431(2002).
10. User Manual, “SIGMA 2000”, KIDGER OPTICS LTD, UK, pp. Ch. 3, 9(1995).

Development of the 2~8X Zoom Beam Expander for the 1064 nm Laser Source

Meyung-Ha Yi and Dong-Hee Lee

Department of Optometry, College of Health Sciences, Eulji University
(Received April 7, 2008; Revised May 13, 2008; Accepted June 10, 2008)

Purpose: To develop the 2~8X zoom beam expander for the 1064 nm laser source. **Methods:** After developing the program by which the initial design values of 3-component zoom tracks can be quickly obtained, we design and develop the zoom beam expander by applying this program and the commercial program of Sigma 2000. **Results:** In this study, we could develop the program by which the initial design values of zoom tracks can be quickly obtained, and by applying this program and the commercial program of Sigma 2000 we could design and develop the zoom beam expander for 1064 nm which is able to zoom from 2× to 8×. The developed zoom beam expander has an efficient diameter of the incidence side of 8 mm, an efficient diameter of the exit side of 32 mm, and a capacity with the finite ray aberration within 0.0001rad. Because the overall length (OAL) is restricted between 125 mm and 135 mm, the change of the whole barrel length which is caused by variations of the zoom driving becomes to be within 10 mm. **Conclusions:** we could develop the program by which the initial design values of zoom tracks can be quickly obtained, and by applying this program we could design and develop the zoom beam expander for 1064 nm which is able to zoom from 2× to 8×.

Key words: 1064 nm, 3-component zoom, beam expander, afocal system