

통계적 실험 계획법을 이용한 광학 벤치 설계 규칙의 설정

박세근*, 이재영, 이승걸
 인하대학교 정보통신 공학부

Optical bench design rule formulated by statistical design of experiment

S. G. Park, J. Y. Lee, and S. G. Lee
 School of Information & Communication, Inha University

ABSTRACT

In order to set up the design rule of micro optical bench, optical coupling efficiencies of two sets of test benches are calculated. Simple linear connections of incoming and outgoing optical fibers with and without ball lenses are designed. Positional errors that are possible in actual fabrication processes are considered in the calculations and their tolerances are determined from 3dB conditions. For a simple fiber-to-fiber connection, the working distance is limited to 2.7um and tilt error 5.8°. When ball lenses are located in front of each fiber, the working distance can be extended over 60um, but the positional errors have the strong interaction among position parameters and thus should be considered simultaneously for tolerance design.

Key Words : Micro optical bench (미세 광학 벤치), Design rule (설계규칙), Coupling efficiency (결합효율)

1. 서론

최근에 광 통신 산업은 급속도로 발전하고 있다. 이러한 광 통신의 발전은 광 통신 소자의 제작시 소형화와 경량화, 그리고 낮은 비용을 원하게 된다. 과거에는 각각의 광 소자를 제작하여 사용하였으나, 이러한 사용방법은 부피가 상당히 크고, 각각의 광 소자를 패키징 함으로써 발생하는 비용으로 인해 가격적인 측면에서도 문제점을 드러내었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 하나의 chip 위에 광 소자를 조립하는 미세광학 벤치¹⁾에 대해 많은 연구가 진행되고 있는 중이다. 이러한 미세 광학 벤치는 각각의 광 소자를 하나의 chip 위에 집적하게 되므로, 각각의 광 소자들의 정렬(align)이 매우 중요하게 된다. 따라서 본 연구진은 각각의 광소자들을 정렬하는데 있어, 공정시에 발생할 수 있는 에러로 인해 정렬이 맞지 않았을 경우에 대해 simulation을 함으로써, 실제로 제작하고자 하는 미세 광학 벤치 설계에 대한 규칙을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 Design of micro optical bench

미세 광학 벤치는 다음과 같이 두가지 경우를 설정하여 설계하였다. 첫번째는, ball lens 가 없는 fiber-to-fiber 와 두번째는, ball lens 가 있는 fiber-to-fiber 에 대해 설계를 하였다. 먼저 ball lens 가 없는 fiber-to-fiber 의 설계 과정을 간단히 그림 1 에 나타내었다. 기판위에 fiber 를 정렬하기 위한 V-groove 를 형성²⁾ 하고(그림 b), 빛이 지나갈 수 있는 길을 동시에 만들어 준다. (그림 c) 이렇게 만든 V-groove 위에 fiber 를 정렬하게 된다.(그림 d)

그림 2 는 ball lens 가 있는 fiber-to-fiber 의 설계 과정을 나타낸 것이다. 먼저 fiber 를 정렬하기 위한 V-groove 를 제작한다(그림 b). V-groove 를 만든 후 ball lens 가 놓일 micro pit 를 제작³⁾한다(그림 c). 마지막으로, fiber 와 ball lens 를 정렬함으로써 설계를 마친다.

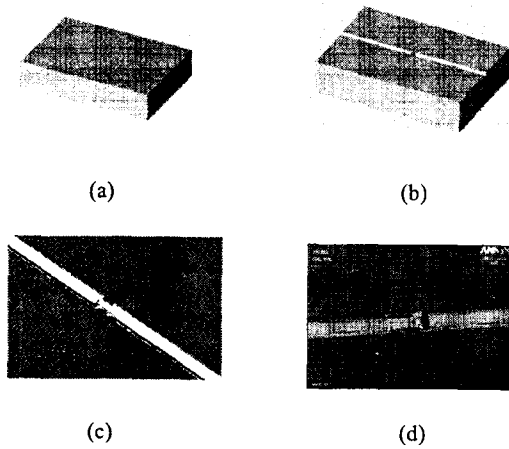


Fig. 1 Design of fiber-to-fiber without ball lens

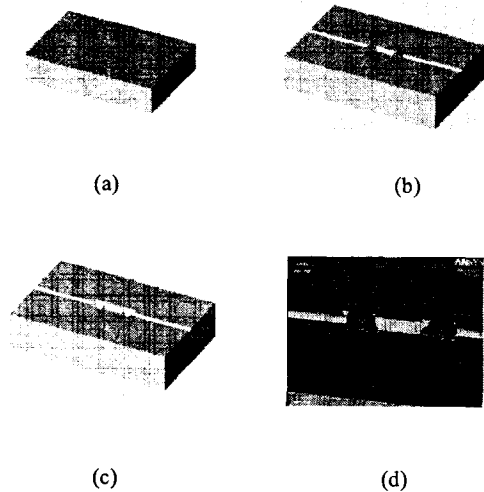


Fig. 2 Design of fiber-to-fiber with ball lenses

2.2 Result of simulation

2.2.1 Fiber-to-fiber without ball lens

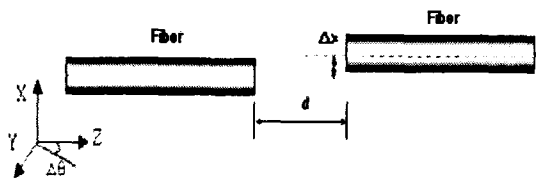


Fig. 3 Schematic of fiber-to-fiber without ball lens

Ball lens 가 없는 fiber-to-fiber 에서는 fiber 사이의 간격(d), 두 개의 fiber 의 중심축으로부터의 상대적 lateral misalignment(Δx), 중심축으로부터의 angular misalignment($\Delta\theta$)에 대해 결합효율을 조사하였다.

그림 4 는 fiber 와 fiber 사이의 거리(d)에 따른 결합효율을 측정하였다. 거리(d)가 30 μm 이내에서는 100% coupling 되는 것으로 관찰되었고, 허용오차(-3dB 점) 또한 30 μm 로 측정되었다.

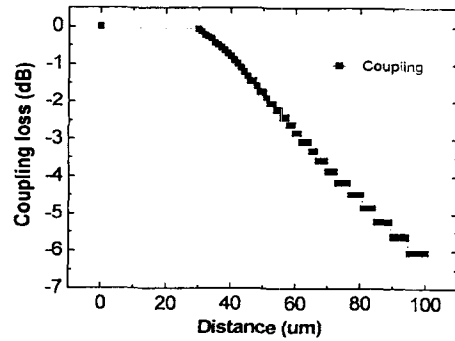


Fig. 4 Coupling efficiency as a function of distance

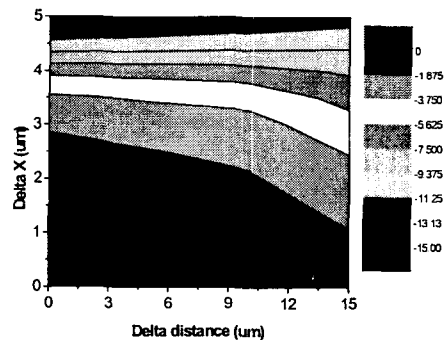


Fig. 5 Coupling efficiency as a function of Δd , Δx

그림 5 는 공정 시 발생하는 에러에 대해 결합효율을 측정된 값이다. Fiber 사이의 거리 $d=50\mu\text{m}$ 로 고정된 상태에서 Δd 에 대해 결합효율을 알아 보았다. $\Delta d=15\mu\text{m}$ 이내에서는 결합효율이 크게 낮아지지 않았다. 반면에 두 개의 fiber 가 중심축으로부터 Δx 만큼의 lateral misalignment 가 있을 경우에는 $\Delta x=3.0\mu\text{m}$ 이상이 되면 결합효율이 -3db 이하로 떨어짐을 볼 수 있다.

그림 6 은 output fiber 가 θ° 만큼 tilt 되어 있을 때, fiber 사이의 거리 d 에 대해 결합효율을 나타내었 나타내었다. 그림 5 와 마찬가지로 $\Delta d=15\mu\text{m}$ 내에

서는 매우 좋은 결합효율을 나타내었지만, $\Delta\theta=6^\circ$ 이상에서는 -3db 이하의 결합효율을 나타내었다. 이상 2 개의 실험에서 fiber 사이의 거리 d 보다는 중심축으로부터의 상대적 lateral misalignment 와 tilt 에 의한 misalignment 가 보다 더 결합효율에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

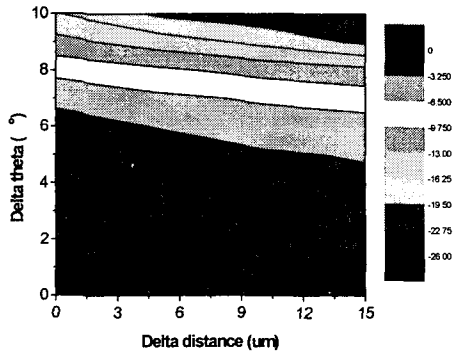


Fig. 6 Coupling efficiency as a function of Δd , $\Delta\theta$

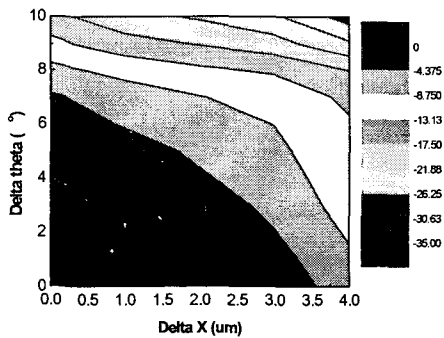


Fig. 7 Coupling efficiency as a function of Δx , $\Delta\theta$

그림 7 은 결합효율에 크게 영향을 미치는 Δx , $\Delta\theta$ 에 대해 simulation 을 한 결과이다. 결합효율이 -3db 가 되는 범위가 이상적인 경우보다는 작아짐을 알 수 있다. 위 결과에서 -3db 의 허용범위는 $\Delta x=2.7\mu m$, $\Delta\theta=5.8^\circ$ 이하의 범위에서 만족하게 된다.

2.2.2 Fiber-to-fiber with ball lenses

광학 벤치의 설계규칙을 설정하는 과정으로 4 개의 소자를 포함하는 경우로써 그림 8 와 같이 2 개의 ball lens 와 2 개의 optical fiber 로 구성된 시스템을 예상하여, 그 허용오차를 구하는 방법론을 제시하고자 하였다. ΔL_1 과 ΔL_2 는 L_1 과 L_2 에 대한 위치 오차이며, ΔX_1 과 ΔX_2 는 ball lens 들이 가질

수 있는 중심축으로부터의 오차이다.

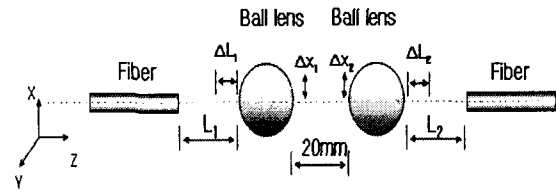


Fig. 8 Schematic of fiber-to-fiber with ball lenses

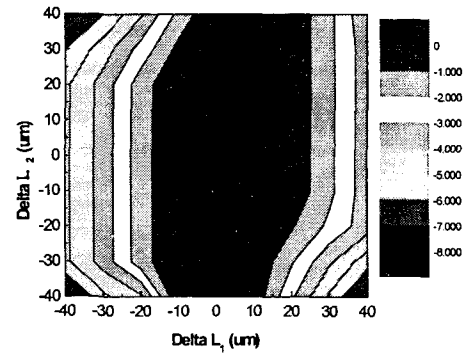


Fig. 9 Coupling efficiency as a function of ΔL_1 , ΔL_2

그림 9 은 $L_1=60\mu m$, $L_2=60\mu m$ 로 고정시킨후, 실제 공정시 발생하는 에러 ΔL_1 과 ΔL_2 에 대해 결합효율을 측정하였다. Ball lens 의 거리는 20mm 로 고정하였다. 입력 쪽의 L_1 에 대한 미소변위 $-25\mu m \leq \Delta L_1 \leq 35\mu m$ 의 허용범위를 갖는 반면, 출력 쪽의 $-40\mu m \leq \Delta L_2 \leq 40\mu m$ 의 허용범위를 갖게 된다. 즉, 입력의 미소변위 ΔL_1 이 출력의 미소변위 L_2 보다 결합효율에 보다 큰 영향을 주고 있다.

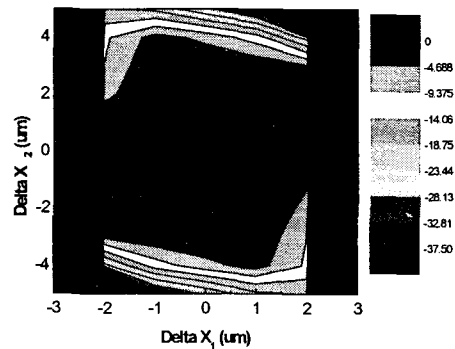


Fig. 10 Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2

그림 10 은 microbench 제작과정에서 식각공정의

error로 인하여 발생할 수 있는 상황으로써, ball lens의 ΔX_1 , ΔX_2 의 변화에 따른 결합효율을 살펴보았다. 이 때 역시 $L_1=60\mu\text{m}$, $L_2=60\mu\text{m}$ 로 고정하였다. 입력쪽의 ball lens의 변위 $-2\mu\text{m}\leq\Delta X_1\leq 1.5\mu\text{m}$ 를 나타내었지만, 출력 쪽의 ball lens의 변위는 $-3\mu\text{m}\leq\Delta X_2\leq 3.5\mu\text{m}$ 를 나타내어, 입력 쪽의 변위가 보다 더 결합효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

마지막으로 L_1 , L_2 , ΔX_1 , ΔX_2 의 4 가지 변수에 대해 결합효율을 측정하였다.

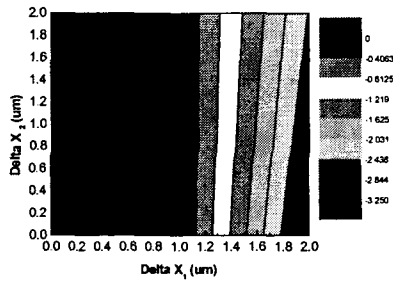


Fig. 11(a) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1, L_2=60\mu\text{m}$)

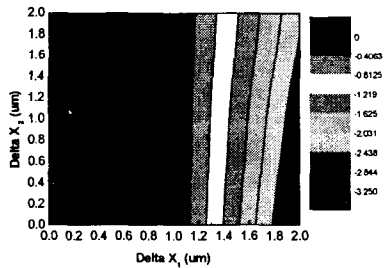


Fig. 11(b) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1=60\mu\text{m}$, $L_2=73\mu\text{m}$)

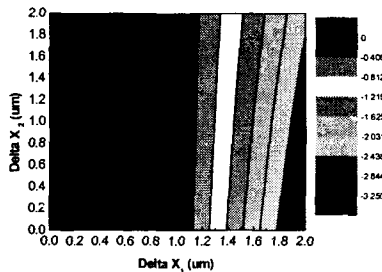


Fig. 11(c) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1=60\mu\text{m}$, $L_2=85\mu\text{m}$)

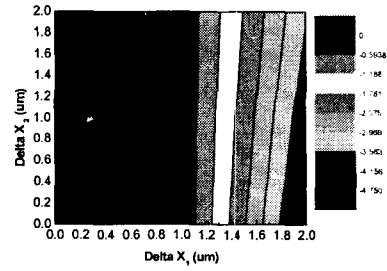


Fig. 11(d) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1=73\mu\text{m}$, $L_2=60\mu\text{m}$)

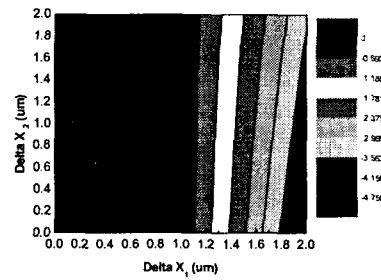


Fig. 11(e) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1=73\mu\text{m}$, $L_2=73, 85\mu\text{m}$)

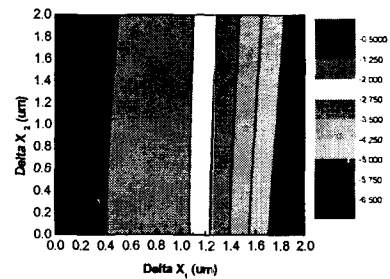


Fig. 11(f) Coupling efficiency as a function of ΔX_1 , ΔX_2 ($L_1=73\mu\text{m}$, $L_2=62, 73, 85\mu\text{m}$)

그림 11에서 본 6 가지의 contour는 4 가지 변수에 대해 simulation을 한 결과이다. Contour에서 보여지듯이, 입력 쪽에서의 fiber와 ball lens의 거리 (L_1), 그리고 입력 ball lens의 변위(ΔX_1)이 변함에 따라 결합효율이 의존함을 알 수 있다. L_1 이 증가함에 따라 ΔX_1 허용오차는 점점 더 작은 범위를 만족하게 된다. 그 결과는 아래 표 1과 같다.

Table 1. Tolerance of position errors for fiber-to-fiber with ball lenses

	ΔX_1	ΔX_2
$L_1=60\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_1\leq 1.8\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_2\leq 2\mu\text{m}$
$L_1=73\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_1\leq 1.6\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_2\leq 2\mu\text{m}$
$L_1=85\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_1\leq 1.2\mu\text{m}$	$0\leq\Delta X_2\leq 2\mu\text{m}$

4. 결론

본 연구진은 미세 광학 벤치를 설계함에 있어 설계규칙을 제시하고자, ball lens 가 없는 fiber-to-fiber 와 ball lens 가 있는 fiber-to-fiber 를 설계하고 결합효율을 측정하였다. Ball lens 가 없는 fiber-to-fiber 에서 두 개의 fiber 사이의 거리 d 보다 fiber 중심축으로부터의 misalignment Δx 와 tilt 에 의한 misalignment 가 보다 더 결합효율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 결과적으로 $\Delta x=2.7\mu\text{m}$, $\Delta\theta=5.8^\circ$ 이하에서 결합효율을 만족하게 된다. Ball lens 가 있는 fiber-to-fiber 에서는 fiber 와 ball lens 의 거리 L_1 , L_2 , 그것의 위치 오차 ΔL_1 , ΔL_2 , 그리고 ball lens 들이 가지는 중심축으로부터의 위치오차 ΔX_1 , ΔX_2 에 대해 결합효율을 측정하였다. 이 같은 경우에는 입력 쪽의 변수(L_1 , ΔL_1 , ΔX_1)가 출력 쪽의 변수(L_2 , ΔL_2 , ΔX_2) 보다 결합효율에 보다 더 영향을 미치는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. L. Y. Lin, J. L. Shen, S. S. Lee, G. D. Su, and M. C. Wu, "Microactuated micro XYZ-stages for free-space micro-optical bench," IEEE, MEMS'97, pp. 43-48, 1997.
2. M. H. Choi, H. J. Koh, E. S. Yoon, K. C. Shin, and K. C. Song, "Self-aligning silicon groove technology platform for the low cost optical module," IEEE, Electronic Components and Technology Conference, pp. 1140-1144, 1999
3. S. S. Lee, L. S. Huang, C. J. Kim, and M. C. Wu, "Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors," IEEE, J. Lightwave Technol., vol. 17, pp. 7-12, 1999.
4. B. E. A. Saleh and M. C. L. Teich, "Fundamental of Photonics," John Wiley & Sons, Inc., 1991.