

## Optical MEMS 응용을 위한 광학 설계

엄용성, 박홍우, 박준희, 최병석, 이종현, 윤호경, 최광성, 문종태  
한국전자통신연구원 집적광모듈팀

### Characterization of Optical Design for Optical MEMS

Yong-Sung Eom, Heung-Woo Park, Jun-Hee Park, Byung-Seok Choi,  
Jong-Hyun Lee, Ho-Kyung Yun, Kwang-Seung Choi, Jong-Tae Moon

Integrated Optical Module Team, Electronics and Telecommunications Research Institute

#### Abstract

As one of the core technologies in the field of the optical communication with WDM, the optical cross connector with movements of micro mirrors is getting important day by day. The packaging structure of 2-dimensional NxN MOEMS switch should be determined by the harmonization of the following items such as the geometrical compatability between optical and structural components, the characteristics of optical input and output parts with device, and the electrical performance for the operation of micro mirrors. Therefore, the packaging process could be defined as the integrated technology completed by the optical and electrical science and the material science for the understanding of its thermo-mechanical properties with packaging materials. In the present study, the harmonization between the optical and structural components as well as the optical characteristics of lens system used will be investigated.

**Key Words :** packaging, optical MEMS, matrix switch, coupling efficiency, lens

#### 1. 서론

실리콘 공정 기술을 근간으로 제작되는 MEMS 소자는 제작자의 의도에 따라 동작되기 위하여 외부에서 입력되는 빛, 전기, 기하학적 변위, 압력 그리고 온도 등과 같은 신호를 외부 환경으로부터의 영향을 최소화 한 상태에서 처리한 후 출력하기 위하여 매우 정밀한 입출력 장치가 필요하다. 특히 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 광통신 기술의 핵심 부품으로서 미소거울의 구동을 이용하는 대용량 Optical MEMS 기술의 OXC (Optical Crossconnector) 시스템은 날로 중요성이 더해지고 있다. NxN 2차원 구조의 MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) 스위치 소자의 패키징을 위하여 입출력 장치 및 소자

내부에서의 광학적 특성, 소자의 구동을 위한 전기적 특성, 그리고 패키지의 기하학적인 구조와 광학계 혹은 전기계 간의 조화를 기본으로 최적화된 패키징 구조가 설계되어야 한다. 따라서 Optical MEMS 구조체의 패키징은 구조물 및 접착제로 사용되는 재료의 열기계적 특성 이해를 위한 재료공학, 입출력단 및 구조체의 광학적 특성 이해를 위한 광물리학, 구조체의 동작을 원활히 하기 위한 전기공학 그리고 구조체와 입출력단의 정밀한 조립을 위하여 마이크로 단위로 공정을 제어 할 수 있는 장치 등과 같은 학문 분야의 포괄적인 이해를 통하여 완성되는 집적화 된 기술이라고 말할 수 있다[1]. 본 논문에서는 패키지 구조와 광학계의 조화성 그리고 높은 광학효율을 유지하기 위하여 사용되는 렌즈의 특성이 비교/분석되었다.

## 2. 패키징 구조설계

### 2.1 소자의 구조 및 개념설계

미소거울을 포함한 광통신용 MEMS 미러소자는 평면상에 matrix 형태로 배열되어 있으며, 마이크로 크기의 거울은 평면에 수직한 방향으로 형성되어 있으며, 광 진행방향축에 대하여 45도 기울어져 있다. 광스위치 소자에서 미소거울을 포함한 전체 소자의 크기는 약  $6 \times 6 \text{mm}^2$  이다[2]. 미소거울은 소자 내부 구조물의 열팽창으로 인하여 구동되는 thermo-elastic 방식으로서 전기를 가하지 않은 상태에서 on, off 상태를 유지하는 latch-up 형태이다. 광신호가 통과하는 자유공간 광도파로의 폭은 약  $54 \mu\text{m}$ 이다.

광스위치 소자, 입출력 광신호를 전달하는 광섬유 그리고 입력되는 빛을 평행광으로 변화시키기 위한 볼렌즈는 높은 광 coupling efficiency를 위하여 정확한 위치에 정렬되어야 한다. 또한 광신호가 입출력되는 소자의 측면에 광섬유가 미소 피치로 동시에 정렬되고 고정되어야 함으로 경제성 등을 고려하여 수동정렬이 적당하다. 따라서 서브 마이크로 단위의 광축정렬을 위하여 (100) 단결정 실리콘 기판의 표면에 V-groove 모양의 홈을 형성하는 SiOB (Silicon Optical Bench) 기술을 사용하는 것이 적당하다. 그림 1은 수동 광축정렬을 위한 실리콘 광학 벤치의 개념도를 나타낸 것으로서 광섬유와 볼렌즈를 고정하기 위하여 실리콘 벤치에 V-groove와 피라밋 모양의 홈을 각각 형성하고, 광축정렬을 위하여 소자가 위치할 부분의 일정 깊이로 식각하는 구조를 나타내고 있다. 소자가 위치할 부분의 표면에는 소자의 동작을 위하여 전기적 배선을 형성한다. 광섬유와 볼렌즈는 각각의 홈에 수동정렬되고 소자는 플립칩 공정을 사용하여 고정하게 된다. 그림에는 나타내지 않았지만 볼렌즈와 광섬유는 그림에 나타낸 실리콘 벤치와 같은 모양의 cap을 사용하여 부분적으로 고정된다. 그림 2는 제작된 실리콘 광학벤치로서 볼렌즈와 광섬유가 장착될 부분의 SEM 사진이다. 광섬유가 장착되는 반대부분에 빛이 통과 할 수 있도록 광경로가 형성되어 있고 광경로 다음부분은 소자가 위치할 공간으로 광축 높이를 정렬하기 위하여 전

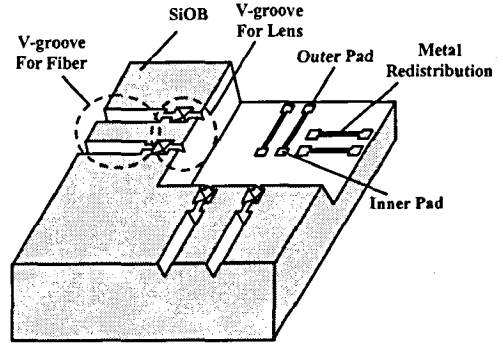


그림 1. SiOB for the passive alignment of optical axis

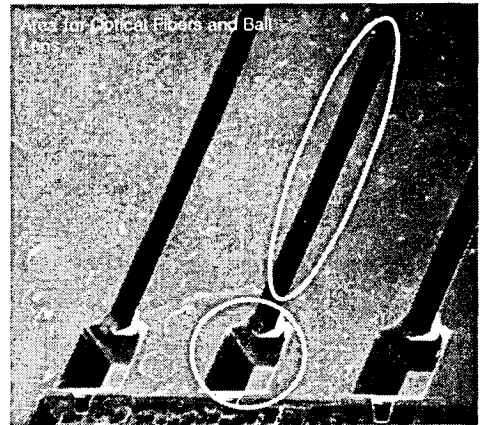


그림 2. SEM photography of SiOB to hold ball lens and optical fiber

체적으로 식각되어 있다.

### 2.2 광학 설계 및 해석

광섬유를 통하여 입력되는 1550nm 파장의 광신호는 렌즈를 통과하며 평행광을 형성한 후, 광스위치 소자 내부의 길이 약 6mm(가장 긴 자유공간)의 공간을 통과한 후 미소거울에서 신호가 90도로 반사된 후 다시 6mm의 자유공간을 통과하여 렌즈로 모아진 빛은 광섬유를 통하여 출력단으로 전송된다.

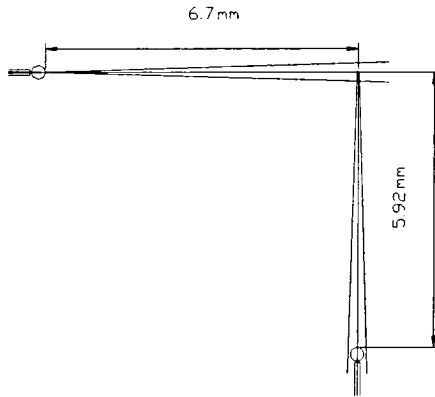


그림 3. Optical analysis with Zemax V10.0

본 연구에서는 상용화된 광학해석 프로그램인 Zemax v10.0을 사용하여 그림 3에 나타난 바와 같이 광학해석을 수행하였다.

실제 현상에서 나타나는 빛의 diffraction 효과를 적용하여 해석한 결과 볼렌즈를 통하여 최소직경의 빛을 얻기 위한 볼렌즈의 초점거리는 25 $\mu$ m인 것으로 확인되었다. 입력단 광섬유의 끝단이 볼렌즈의 초점거리에 위치하는 경우 볼렌즈를 통과한 빛은 그림 3에 나타난 바와 같이 약 1.69의 divergence angle로 확산되고 사각형 모양의 미소 거울에 반사된 후 출력단에 위치한 볼렌즈를 통하여 출력단 광섬유로 전달된다. 그림 3에 나타난 바와 같이 출력단에 도달한 빛의 직경은 볼렌즈의 직경보다 큼으로 인하여 매우 작은 coupling efficiency가 예상된다. 그림 4는 패키징 공정을 위한 입력단 광섬유의 광축방향으로의 정렬 공차를 나타내 것이다. 광효율 해석을 통하여 입력단 광섬유가 볼렌즈의 초점거리에 위치하는 경우 출력단에서 최대 광효율을 얻기 위한 출력단 광섬유의 끝단과 볼렌즈의 거리는 10 $\mu$ m인 것으로 확인되었다. 그림 4는 출력단 광섬유의 끝단과 볼렌즈의 거리를 10, 25 $\mu$ m로 고정한 후 입력단 광섬유의 끝단과 볼렌즈 간의 거리에 따른 광효율을 계산한 결과이다.

입력단과 출력단에서 광섬유의 끝단과 볼렌즈 간의 거리를 동일하게 유지하는 것보다 출력단 광섬유와 볼렌즈 간의 거리를 약 10 $\mu$ m로 유지하는 경우 약 4dB의 광효율이 증가하는 결과를 얻었고,

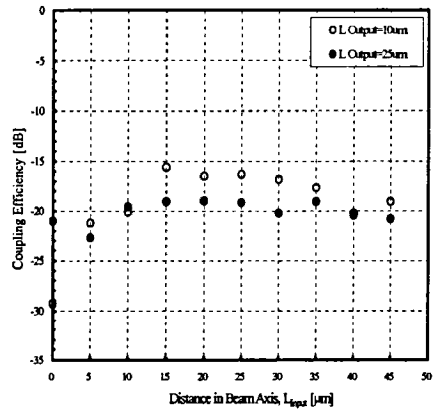


그림 4. Alignment tolerance in optical axis

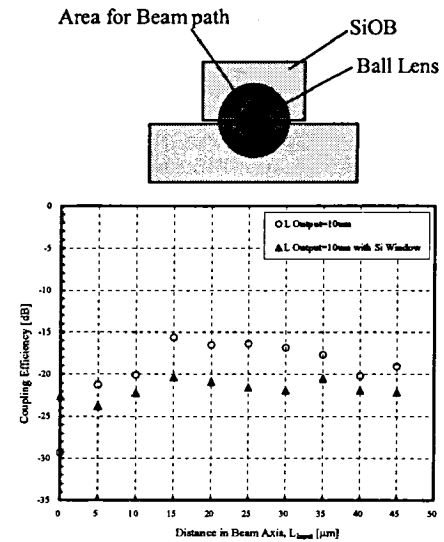


그림 5. Coupling efficiency of collimator with ball lens

광축방향에서 입력단 광섬유 끝단과 볼렌즈 간의 정렬 공차는 약  $\pm 7\mu$ m인 것으로 확인되었다. 그러나 실제 볼렌즈를 사용하여 평행광을 형성하는 경우 볼렌즈의 물리적 고정을 위하여 볼렌즈가 위치하는 부분은 피라밋 모양의 홈이 형성되고 빛의 통과를 위하여 실리콘 광학 기판 위에 그림 5에 보여진 것과 같은 형상의 beam path가 형성되고,

이러한 형상의 beam path를 통하여 빛이 입출력 하게 된다. 그림 5는 이러한 beam path를 위한 window를 모델링에 적용하여 해석을 수행한 결과 이다. Beam path의 존재로 인하여 전체적으로 약 4-5dB의 손실이 추가적으로 발생하였다. 결론적으로 보다 실제적인 광효율 계산을 위하여 beam path의 형상과 크기, 빛을 반사하여 전송하는 미소 거울의 반사를 등이 설계에 고려되어야 하며, 특히 입력단 부분의 beam path 크기와 형상은 coupling efficiency에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

### 3. 광학실험 결과 및 토의

#### 3.1 실험장치 및 방법

광섬유 또는 볼렌즈를 통하여 방출되는 빛의 직경을 광출력면에서의 거리에 따라 측정하였다.

실리콘 기판에 광학벤치를 제작하여 볼렌즈를 위치하고, 광섬유의 끝단은 마이크로미터에 고정하여 광섬유의 끝단과 볼렌즈간의 간격을 조절 할 수 있도록 한 후, 방출빛의 직경을 측정하기 위하여 chopper를 위치하였다. Chopper는 마이크로미터에 연결되어 볼렌즈와의 거리를 조절하여 출력 광의 크기를 측정 할 수 있게 하였다.

Chopper의 옆에는 출력광의 세기를 측정 할 수 있는 직경 3mm의 sensing area를 갖는 optical power meter를 위치하였다. Power meter는 마이크로미터에 부착되어 있음으로 출력되는 광이 전량 감지될 수 있는 최대 거리에 위치함으로 실험의 측정오차를 최소화하였다.

그림 6은 실험을 위하여 실리콘 광학 벤치 위에 볼렌즈와 광섬유가 장착된 사진으로서 정확히 렌즈



그림 6. Photography of aligned ball lens and optical fiber on SiO<sub>2</sub>

와 광섬유의 광축이 일치하고 있다.

Chopper는 원형의 평면에 반경방향으로 사각형 모양의 구멍이 뚫려 있는 형태이다. 원판은 원의 중심을 축으로 회전하면서 광학계에서 방출되는 빛을 통과시키게 되는데 원판의 회전에 따라 power meter에는 그림 7과 같은 그래프가 나타나게 된다.

출력되는 빛이 chopper를 전량 통과하는 경우 그래프에서 1.0의 값을 나타내며 chopper가 회전함에 따라 통과되는 빛의 양은 감소되어 0에 이르게 된다. 따라서 그래프에서 빛의 세기가 1에서 0으로 감소하는 시간을 측정하면 chopper를 통과하는 빛의 직경(D)을 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$D = \frac{2\pi f R \Delta t_1}{n}$$

일반적으로 가우시안 빔 이론에서 빛의 직경은 최대 beam intensity의 1/e<sup>2</sup>가 되는 지점에서 정의 됨으로 가우시안 프로파일을 갖는 빔이 chopper를 통과하는 것으로 계산하면 power meter에 검출되는 광의 세기가 2.3% 감소하는 지점이 가우시안 빔 이론에서 제시하는 광의 직경과 일치한다. 따라서 그래프에서 광의 세기가 최대 최소인 점으로부터 2.3% 감소된 지점 사이의시간을 측정하여 빛의 직경을 계산할 수 있다.

#### 3.2 입출력광의 직경 및 coupling efficiency

그림 8은 직경 300, 750μm인 두 종류의 볼렌즈를 사용하여 chopper의 위치를 볼렌즈로부터 1.5mm

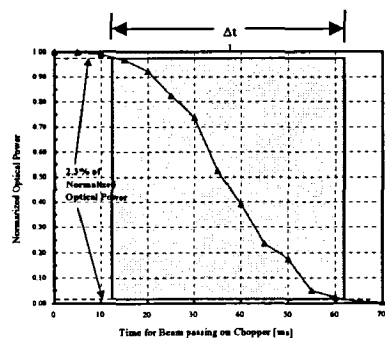


그림 7. Optical power measured with chopper

와 5.0mm 유지한 상태에서 광섬유의 끝단과 볼렌즈 간의 거리를 변화시키면서 출력되는 beam의 직경을 측정하였다. 두 종류의 볼렌즈에 대하여 광섬유의 끝단이 볼렌즈와 접촉된 후 멀어지면서 광의 직경은 감소하는 경향을 나타내었고 점차 감소하다가 다시 증가하는 현상을 나타내었다. 광의 직경이 최소가 되는 지점이 렌즈의 초점거리로 생각할 수 있다. 평행광을 형성하는 것이 본 연구의 목적이므로 볼렌즈로부터 약 5.0mm 거리에서 측정된 결과를 보면 직경 300, 750 $\mu$ m의 볼렌즈의 초점거리는 각각 30, 80 $\mu$ m를 나타내어 기하광학 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 볼렌즈로부터 1.5mm 거리에서 측정된 광직경 결과에서는 초점거리가 각각 40, 140 $\mu$ m를 나타내었는데 이는 광섬유로부터 출력되는 빛이 점광원이 아닌 직경 10 $\mu$ m의 광섬유 core 면으로부터 출사되는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 9는 그림 8로부터 얻어진 렌즈의 초점거리에 광섬유의 끝단을 고정한 후 출력되는 광의 직경을 측정한 결과이다. 거리가 증가함에 따라 광의 직경은 증가하는 것으로 측정되었고, 약 12mm의 거리에서 광의 직경은 직경 300, 750 $\mu$ m 볼렌즈에 대하여 각각 약 600, 300 $\mu$ m의 크기를 나타내어 기하광학해석 결과와 큰 차이를 나타내었다.

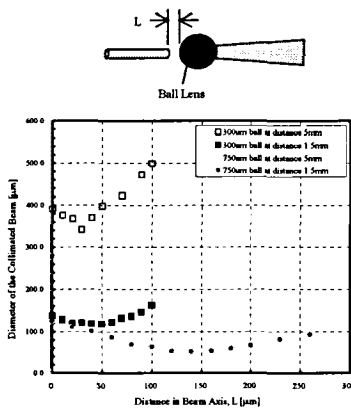


그림 8. Beam diameter changes according to the distance(L) between ball lens and optical fiber

그러나 직경이 큰 볼렌즈의 경우 출력되는 빛의 divergence angle이 더 작은 값을 나타냄으로 직

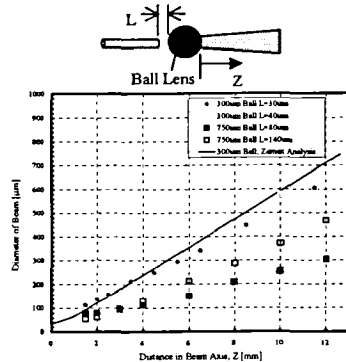


그림 9. Beam diameter measured from the collimator with ball lens

경이 큰 볼렌즈 일수록 평행광은 안정적인 것을 알 수 있으며 빛의 diffraction 효과가 상대적으로 감소되는 것으로 유추된다. Zemax 프로그램을 사용하여 300 $\mu$ m 직경의 볼렌즈를 사용하여 얻은 광직경은 실제 측정결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

메트릭스 형태의 광스위치 소자를 수동정렬에 의한 패키징 공정을 수행하기 위하여 정밀한 가공 공차를 갖는 실리콘 광학 벤치를 사용하였다. 미소거울의 크기, 미소거울 간의 피치, beam coupling 거리 등과 같은 기하학적인 패키징 조건에 따라서 평행광을 형성하기 위한 광학렌즈가 조화롭게 선정되어야 한다. 평행광의 길이가 1mm 미만이면 볼렌즈를 사용하는 것이 유리하지만, 5mm 이상의 거리에서 평행광을 유지하기 위해서는 패키징 구조의 기하학적인 조건을 고려하여 가능한한 큰 직경을 갖는 GRIN Rod 렌즈를 사용하는 것이 적당하다.

#### 참고문헌

- [1] R. Mehalso, "MEMS packaging and microassembly challenges," *SPIE*, Vol. 3893, Australia Oct. 1999.
- [2] J.-H Lee, M.-L Lee, W.-I Jang, C.-A. Choi and Y.-T. Kim, "A planar latch-up microactuator driven by thermoelastic force," *SPIE*, Vol. 4176, pp.264-271, Sep. 2000.