

### 광선추적법을 이용한 핸드피스용 광섬유 광학계 시뮬레이션 및 특성 평가

박진홍\*, 김 휘, 양병춘, 이병호

국가지정 홀로그래피 기술 연구실, 서울대학교 전기공학부

유영종<sup>(1)</sup>, 김대욱<sup>(1)</sup>, 이창원<sup>(1)</sup>, 안세영<sup>(1,2)</sup>

(주)솔고 바이오메디칼<sup>(1)</sup>, 서울대학교 자연과학대학 물리학부<sup>(2)</sup>

### Simulation and evaluation of fiber optics for hand-piece using ray tracing method

J. H. Park\*, H. Kim, B. Yang, and B. Lee

National Research Laboratory of Holography Technologies, School of Electrical Engineering Seoul National University

Y. J. Yoo<sup>(1)</sup>, D. W. Kim<sup>(1)</sup>, C. W. Lee<sup>(1)</sup>, and S. Y. Ahn<sup>(1,2)</sup>

Solco Biomedical<sup>(1)</sup>, School of Physics Seoul National University<sup>(2)</sup>

**Abstract** - The hand-piece fiber optics is applied to medical appliances such as glaucoma therapy to focus semiconductor laser on the affected parts efficiently. In this paper, we evaluate optical properties such as beam power and radius of a hand-piece probe by experiments and we also simulate the hand-piece optics by ray tracing method in order to study major parameters to optimize focalization ability. As results, we show experimental and simulation results of the hand-piece optics and also summarize several requirements that have to be considered in optimizing the hand-piece optics.

#### 1. 서 론

녹내장 치료용 의료광학기구에 적용되는 반도체 레이저의 경우 광원으로로부터 발산되는 광을 효율적으로 집속시키기 위해 광섬유 광학계를 이용한 핸드피스(hand-piece)가 사용되고 있다. 핸드피스 프로브(probe)의 구성은 레이저 다이오드에서 방출되는 레이저 광을 핸드피스까지 전달하는 다중모드 광섬유(multi-mode optical fiber)와 광섬유 출력단에서 환자의 환부까지 광을 집속시키는 역할 하는 볼(ball)렌즈, 그리고 안구에 직접 접촉하여 치료를 행할 수 있도록 핸드피스의 가이드(guide) 역할을 하는 구조물로 구성되어 있다. 광섬유 또는 광섬유 다발(bundle)에서 방출된 레이저 광을 시술에 효율적으로 사용하기 위한 핸드피스는 실제 의료 시술자가 환자의 환부에 레이저를 조사하여 의료행위를 하는 정밀성과 안정성이 요구되는 기구이므로 이에 대한 광학적 특성 평가가 요구된다. 또한 광섬유 출력단에서 방출되는 레이저를 집속시킬 때 최소의 손실을 가지며 레이저의 세기를 전달하기 위해서는 높은 결합효율을 갖는 광학계 설계가 필수적이다.

본 논문에서는 실험을 통해 핸드피스 프로브의 광학적 특성을 평가하였고, 기하광학 이론을 기반으로 한 광학계 설계 및 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 핸드피스의 광학계와 광결합 광학계를 시뮬레이션 함으로써 집속 성능을 최적화시킬 수 있는 요인들에 대하여 연구하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 핸드피스 광학계의 광학적 특성 평가

핸드피스 프로브의 광섬유 출력단에 장착되어 있는 볼렌즈의 곡률 및 결합 방법을 평가하고 시뮬레이션을 위

한 변수들을 추출하기 위해 광학현미경을 이용하여 광학계의 구조를 분석하였다. 분석 결과, 다중모드 광섬유는 약 600 $\mu$ m의 지름을 갖고 있으며 볼 렌즈의 결합 방식은 아크(arc)로 광섬유 끝단을 용융시켜 렌즈화 한 것으로 확인되었다.

핸드피스를 이용하여 시술시 적정 시술 범위를 얻기 위해 광섬유 출력단에서 레이저가 방출될 때 거리에 따른 빔의 출력과 크기의 변화를 실험적으로 평가하였다. 핸드피스 출력단에서 레이저가 방출될 때 빛의 진행방향에 따른 출력 변화를 0.1mm간격으로 측정한 결과, 출력단에서 멀어질수록 출력은 지속적으로 감소하는 경향을 보이지만, 약 0.5mm ~ 1mm 범위 내에서는 출력이 감소하지 않고 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 출력이 일정하게 유지되는 지점에서 볼 렌즈의 초점거리 및 초점심도(depth of focus)를 예상할 수 있다.

최소 빔의 반경과 초점거리 및 초점심도를 얻기 위해 칼날(knife-edge)방법을 이용하여 거리에 따른 빔의 반경의 변화를 측정하였고, 측정된 데이터로부터 빔 반경으로 변환시 정확성을 높이기 위하여 변환 알고리즘을 사용하였다[1]. 그림 1에 거리에 따른 출력크기 및 빔 반경의 변화를 나타내었다. 빔의 반경은 광섬유 출력단으로부터 0.3mm ~ 1.2mm 거리에서 집속되어 안정된 크기를 가지며 이후 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이는 출력크기 측정 실험에서도 확인된 결과이다.

이러한 실험결과를 기반으로 핸드피스의 광학적 특성을 분석하고 렌즈 곡률, 초점거리등과 같은 변수들을 추출함으로써 광학적 성능에 영향을 미치는 요인들에 대해 시뮬레이션 하였다.

##### 2.2 핸드피스 및 광결합 광학계 시뮬레이션

광선 추적 방식을 통해 다중모드 광섬유 내부에서의 광의 도파 현상과 핸드피스 출력단의 볼 렌즈에서의 광의 방출 현상을 시뮬레이션 하였다. 또한 효율을 높이기 위해 입력단에서의 광결합 광학계를 시뮬레이션 함으로써 핸드피스의 집속 성능을 최적화할 수 있는 요인들에 대해 연구하였다.

실제의 핸드피스 모델에서는 다중 모드 광섬유의 길이가 수 미터 정도로 길고 휘어짐도 있을 수 있을 수 있지만, 본 논문에서 다중모드 광섬유는 일정한 길이를 갖고 벤딩(bending)이 없는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 변수들은 실험을 통해 얻어진 값들을 사용하였고, 다중 모드 광섬유의 코어(core)의 굴절률은 1.613556, 클래딩(cladding)의 굴절률은 1.462331로 하였다. 핸드피스에 대한 광결합 특성을 조사하기 위하여 시뮬레이션 변수를 변화시키며 출력면에서 방출되는

광 효율과 광의 방출 현상을 모사하였다. 광 효율은 다음과 같이 일반적인 방법으로 정의하였다.

$$EF = \frac{\text{Number\_of\_Output\_Rays}}{\text{Number\_of\_Input\_Rays}} \times 100 (\%)$$

광선추적방식을 통해 핸드피스 광학계의 입력단과 출력단에서의 현상을 시뮬레이션 하였고 효율을 높이기 위해 입력단에서의 광결합 광학계를 모델링 하였다. 다중모드 광섬유는 일정한 길이를 갖고 벤딩(bending)이 없는 것으로 가정하였다.

이론적으로 다중모드 광섬유의 코어(core)에 NA (numerical aperture)안의 입사각을 갖도록 광을 입사시키면 광섬유 내로 도파할 수 있으나 실제 광섬유에는 벤딩이 존재할 수 있기 때문에 이론적인 NA보다 더 작은 각도의 NA안에 광을 입사시켜야 손실을 줄일 수 있을 것이다. 광의 입사각도 변화에 따른 전송 효율을 알아보기 위해 17, 29, 40의 입사각에 대해 시뮬레이션 한 결과, 전송효율이 각각 79%, 29.6%, 17.8%로 감소함을 확인할 수 있다. 그림 2(a)에 결과를 도시하였다.

광섬유 출력단에 장착된 볼 렌즈는 작은 구면렌즈로 생각할 수 있으며 이러한 경우 구면수차가 집속 능력에 크게 영향을 미치게 된다(그림 2(b)). 시뮬레이션 결과 크게 볼 렌즈는 렌즈 자체에 존재하는 구면수차의 영향으로 인하여 충분한 집속 능력을 갖지 못하고 일정한 거리 안에서 빔 크기를 코어에 가까운 크기로만 유지시켜 주는 것을 확인할 수 있었다. 이는 광 특성평가 실험에서도 확인된 결과이다.

다음으로 광결합시 광섬유 입력단에서 초점거리의 정렬오차에 따른 광의 방출현상을 모사하였다. 입력단에서 입사광이 제대로 집속되지 않은 경우에 광이 광섬유를 따라 도파하며 클래딩으로 많은 에너지가 빠져나가게 되는 것을 볼 수 있다(그림 2(c)). 입사광이 광섬유의 NA범위 안에 포함되고 초점에 정확히 맞으면 광섬유 출력단에서 광축을 포함하는 볼 렌즈의 일부 영역만을 광이 지나기 때문에 집속 성능이 볼 렌즈의 전체 형상에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다.

녹내장 치료용 레이저는 높은 출력을 갖는 광 집속을 요구하기 때문에 다수의 반도체 레이저를 병렬로 배열한 후 각 광원에 연결된 광섬유를 다발로 구성함으로써 에너지를 증폭할 수 있는 방법을 생각해 볼 수 있다. 이를 위해 광섬유 다발로부터 방출되는 에너지를 하나의 다중모드 광섬유 입력단에 집속시키는 광결합 광학계 설계가 요구된다. 본 연구에서 광섬유 다발은 다중모드 광섬유를 3 by 3으로 배열하여 구성하였고 렌즈 광학계를 사용하여 이를 핸드피스 입력단에 집속시키는 광학계를 모델링 하였다. 그림 3에 광섬유 다발과 광섬유와의 광결합 광학계 모델링 결과를 나타내었다. 그러나 시뮬레이션 결과는 실제와 차이가 있을 수 있기 때문에 실험을 통한 평가가 요구된다.

이상의 결과에서 광학계를 최적화 하기위한 설계 요구조건을 얻을 수 있다.

첫째, 핸드피스의 다중모드 광섬유 코어에 광이 최대한 가이드(guide)되도록 하기 위해서는 광섬유 다발의 입사광이 다중모드 광섬유의 이론적 NA보다 작은 한계 입사각을 갖도록 하는 NA를 찾고, 이 한계 입사각 이하의 입사각을 갖는 광 다발을 만들 수 있어야 한다.

둘째, 광결합 광학계의 초점을 다중모드 광섬유의 코어에 정확히 정렬할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위해서는 초점심도(depth of focus)를 크게 하여야 한다.

마지막으로 렌즈 면을 최소화 하여 광학계의 효율을 최대로 유지하여야 한다. 이를 위해서는 도파로 기반의 광결합 광학계보다는 공간연결이 유리하다.

구면렌즈는 구경이 작아질수록 구면수차에 의한 고유한 영향이 크기 때문에 구면렌즈 만으로 이루어진 광결합 광학계를 설계할 경우 구면수차에 의한 초점 능력의

약화와 광 손실을 감수하여야 한다. 이에 대한 대안으로는 정밀한 비구면 렌즈의 도입이나 회절광학소자의 도입을 생각해 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 실험을 통해 핸드피스 광학계의 광학적 특성을 고찰하였고, 광 전송 효율과 집속 능력 측면에서 높은 결합 효율을 얻기 위한 핸드피스 광학계의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 핸드피스 출력단의 구면 렌즈의 형상이 아니라 입력단에서의 광결합 광학계의 성능과 정렬의 정밀도임을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있었다. 또한 광학계를 최적화시키기 위한 설계 요구조건들을 제시하였다. 향후 핸드피스 광학계의 광학적 특성을 충분히 고려하여 최적의 광결합 광학계를 위한 렌즈 모듈을 설계할 예정이며, 또한 광원과 광섬유 다발사이의 결합 효율을 향상시키기 위해 회절광학소자를 이용한 광결합 광학계를 설계할 예정이다.

#### (참 고 문 헌)

- {1} W. Plass, et al. High-resolution knife-edge laser beam profiling. *Optics Communications*, vol. 134, pp. 21-24, 1997.

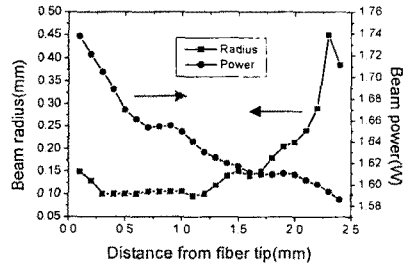


그림 1. 거리에 따른 출력 및 빔 크기의 변화

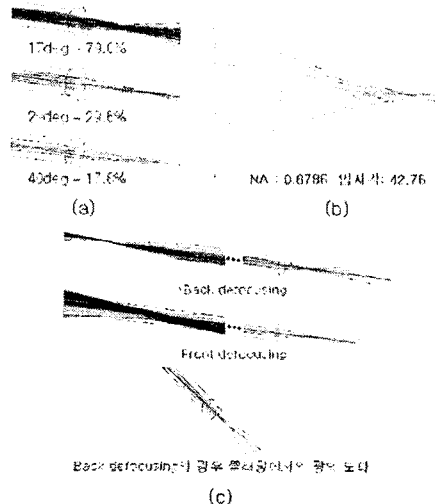


그림 2. 광섬유 및 광결합 광학계 시뮬레이션 결과



그림 3. 광섬유 다발과 다중모드 광섬유와의 광결합 광학계 모델링