

## 비결상 광학계를 이용한 고풠력 DPSSL의 수치 설계 연구

### Numerical Design of the DPSSL that using the Non-imaging Optical Pumping System

김선국, 이성만, 윤미정, 남성모, 차병현, 이종민

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

고출력의 DPSSL을 설계하기 위해서 광선 추적법을 코드를 개발하였다. 이 코드를 이용하여 비결상 광학계시스템을 DPSSL 광학계에 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 CPC (Compound Parabolic Concentrator)를 이용하는 광 펌핑시스템에 대해서 수치 시뮬레이션을 통해서 최적의 설계변수를 찾아내었다. 또한, V-duct를 이용하는 광펌핑 시스템에 대해서도 수치 시뮬레이션을 통해서 V-duct 시스템의 특성을 연구하였다. 이러한, 비결상 광학계를 이용한 광펌핑 시스템은 레이저의 특성이 우수하다. 두 개의 시스템에서 레이저 결정에 흡수되는 광분포를 계산하여 레이저의 출력분포를 예측하였다. 또한, 두 가지 시스템의 장단점에 대한 논의가 이루어졌다.

#### Abstract

For the DPSSL we have developed a ray-tracing code. Using this code we did the simulation of non-imaging optics system for the DPSSL. CPC (Compound Parabolic Concentrator) is studied by this simulation and we carried out the optimization of CPC design parameters. As another non-imaging optics system, V-duct was studied for the optical pumping system of DPSSL. Also were done of the light absorption distribution calculations in the laser crystal. Using this result we estimated the laser output power of the DPSSL system.

## 1. 서론

지난 20년간 다이오드 여기 고체 레이저(DPSSL, Diode-Pumped Solid-State Laser)는 실험실 수준에서 저출력의 레이저 다이오드를 사용하여 다양한 연구가 이루어져 왔으나, 고가인 레이저 다이오드의 가격과 고집적된 레이저 다이오드 개발의 어려움에 의해 고풠력 레

이저 개발과 응용분야의 확대에 제한을 받아왔다. 최근, DPSSL은 여기원인 레이저 다이오드 파장의 다양화, 출력의 증강, 가격의 저렴화와 고품질 레이저 매질과 레이저 설계기술의 개발로 인하여 출력이 수 kW에 이르게 되었고, 고효율, 장수명, 고신뢰성, 경량 등의 탁월한 장점도 갖고 있기 때문에 레이저 가공, 의료용 레이저, 원자력 산업, 반도체 산업, 환경 산업 등의 응용 분야에서 기존의 레이저 시스템들을 대체할 새로운 레이저 시스템으로 급부상하고 있다.

다이오드 레이저로 Nd:YAG를 펌핑할 때, 가장 중요한 점은 고출력의 펌프 빔을 레이저 결정에 효과적으로 커플링하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 원형 대칭 인접-커플링 구조, 광섬유 커플링, 비광학적 공동 등이 사용되었다. 원형 대칭 인접-커플링 구조는 펌핑소스를 레이저 결정에 인접시키는 구조로서 32% 정도의 광학적 기율기효율을 보인다[1,2]. 그러나 고출력을 위해서는 다수의 적층 다이오드레이저가 필요하고, 다이오드 레이저의 파장을 레이저 결정의 최대 흡수 영역에 정확히 맞추어야하는 등의 단점이 있다. 광섬유 커플링을 이용하면 46% 정도의 상당히 높은 광학적 기율기효율을 얻을 수 있다[3]. 그러나 많은 비용이 들고 광섬유-커플링 손실이 있다.

이에 비해 CPC를 이용한 커플링구조는 고출력으로 쉽게 확장 가능하고, 파장 이동에 민감하지 않으며, 구조가 단순하고, 비용이 적게 드는 장점이 있어서 지난 수년간 연구되어 왔다. 반사형 CPC의 결합 방법은 1993년에 Koshel등에 의해 처음 제안되었다[4]. 그리고 반사형 CPC의 변형인 커스프타입 CPC를 이용하는 경우 26%의 광학적 기율기효율을 얻었다[5]. Chang등은 투과형 CPC를 이용하는 경우 40%의 광학적 기율기효율을 얻을 수 있음을 보였다[6]. 그러나 투과형 CPC로 고출력 Nd:YAG레이저를 펌핑할 때의 정확한 설계 방법이나 그 분석은 아직 되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 적층 다이오드 레이저로 Nd:YAG 결정을 펌핑할 때, CPC와 난반사 공동과 V-형 덕트와 난반사 공동을 결합시킨 구조에서 설계변수를 변화시켜 적층 다이오드 레이저의 출력을 Nd:YAG 결정에 효과적으로 분포시키는 구조를 광선추적법[4]을 이용하여 분석하였다. 여기서 CPC와 V-형 덕트는 다이오드 레이저로부터의 출력을 집속시키는 역할을 하며, 난반사 공동은 이렇게 집속된 광선을 분배하는 역할을 한다. CPC의 경우, 다이오드 레이저의 방출면의 크기와 CPC의 입구를 맞추기 위하여 입구부분을 절단한 절단형 CPC[7]이다. 설계변수로 수용각도( $\theta_s$ ), 출구 반폭길이(b), 모양 오차( $\sigma$ )를 택하여 이들의 변화에 의한 변형이 결합 효율과 균일성에 미치는 영향을 광선추적법을 통하여 분석하였다.

## 2. 본론

### 2-1. 흡수 분포 모델링

이득 매질 내에 축적되는 펌프 빔 즉 흡수 분포 또는 이득 분포는 유도 방출을 통해 레이저 출력으로 전환된다. 흡수 분포의 Profile은 이 전환의 효율에 중요한 영향을 미친다. 이러한 흡수분포는 광선추적법을 이용하여 정확히 구할 수 있고, 이 광선추적법은 펌프 공동의 기하학적 구조에 크게 의존한다.

적층 다이오드 레이저의 고출력 펌프 빔을 레이저 결정 붐으로 효과적으로 전달하기 위

하여 광선 추적 코드가 이용되었다. 이 코드는 크게 세부분으로 구성되는데, 첫째는 펌프 소스의 방출 형태의 모델링, 둘째는 각각의 광학 면에서의 광선의 진행, 굴절, 반사 그리고 셋째는 레이저 결정 내에서의 펌프빔의 흡수와 분포이다.

흡수 분포를 정확히 모델링하기 위해서 펌프 공동내의 여러 가지 요소들이 모델링된다. 먼저 펌프 소스의 모양, 크기, 방출 각도 분포 등에 의해 광선을 결정하고, 이 광선은 펌프 공동 반사체에 의해 이득 매질로 전달된다. 이 때 반사체는 다양한 모양, 배치, 표면 구조를 가질 수 있다.

### 2-1-1. 광선추적방법

다이오드 레이저는 807nm에서 300W의 출력을 내고, 12개의 선형 다이오드 어레이로 구성되었으며 빔의 발산각도는 slow axis에 대해 6도(FWHM), fast axis에 대해 54도(FWHM)이다. 본 설계에서는 fast axis가 결정축에 평행하게 배치되었다. 다이오드로부터의 실제 방출분포는 6도에서 FWHM을 보이고, 5도안에 85%의 출력이 포함되고 6도안에는 95%의 출력이 포함된다. 이를 모델링하기 위해 다음과 같은 수정된 로렌츠분포를 이용하였고, 수정된 로렌츠분포로부터 random한 각도를 발생시키기 위하여 몬테-카를로 방법을 사용하였다.

$$g(\theta) \approx 1 - (\theta/3.57)^4$$

투과형 CPC는 적층 다이오드 어레이로부터의 펌프빔을 레이저 결정으로 효과적으로 가이드 하기 위해 사용되며 표면 반사율은 90%로 하였다.

각각의 광선은 CPC 표면에서 다음과 같이 표현되는 Snell의 법칙에 따라 반사된다.

$$r'' = r - 2(n \cdot r)n$$

여기서  $r''$ 와  $r$ 은 각각 반사광선과 입사광선의 단위벡터이고,  $n$ 은 반사 지점에서의 표면 법선 단위벡터를 나타낸다.

난반사 공동은 반사 손실없이 CPC를 통해 투과된 광선을 레이저 결정에 균일하게 전달하기 위해 이용되며, 800nm에서 반사율이 95.7%이고 [8], 표면에서 다음 식과 같은 Lambertian 반사 분포를 갖는다.

$$P(\theta)d\theta = \frac{1}{2} \cos \theta d\theta$$

레이저 결정의 흡수를 계산하기 위하여, 레이저 결정의 단면을 반지름방향으로 100개로 각도 방향으로 100개로 나누어 전체 10000개의 구역으로 나누었다. 1회 샘플링 거리  $\Delta d$  동안에 구역(i,j)에 흡수되는 출력은 다음과 같다.

$$P_{obs,i,j} = P_{0,i,j}(1 - \exp(-\alpha \cdot \Delta d))$$

여기서  $P_{0,i,j}$ 는 샘플링하기 이전의 출력으로  $P_{0,i,j} = P_0 \exp(-\alpha \cdot d)$  이고,  $\alpha$ 는 Nd:YAG결정의 흡수계수이며,  $d$ 는 초기 위치부터 최근 샘플링 지점까지의 광선 전파거리이다. 각각의 광선은 초기 출력의 1%가 될 때까지 광선 추적된다.

## 2-1-2. CPC의 구조

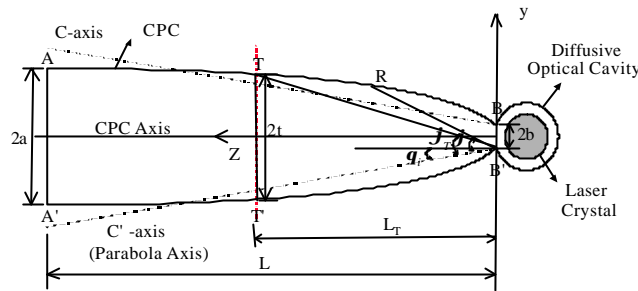


그림. CPC의 구조도

출구의 중앙을 직교좌표의 원점으로 잡고  $z$ 축을 CPC의 축에 평행하게 배치하면 상단의 CPC를 기술하는 방정식은 다음과 같다.

$$y = r \sin(\phi - \theta_i) - b = \frac{2f \sin(\phi - \theta_i)}{1 - \cos \phi} - b$$

$$= \frac{2b(1 + \sin \theta_i) \sin(\phi - \theta_i)}{1 - \cos \phi} - b \quad (1)$$

$$z = r \cos(\phi - \theta_i) = \frac{2b(1 + \sin \theta_i) \cos(\phi - \theta_i)}{1 - \cos \phi} \quad (2)$$

절단형 CPC의 입구 반폭길이는  $t$ 는

$$t = -b + f \sin(\phi_T - \theta_o) / \sin^2 \frac{1}{2} \phi_T \quad (3)$$

이고, 여기서  $f$ 는 포물선의 초점길이로서  $f = b(1 + \sin \theta_o)$ 이고,  $\theta_o$ 는 절단형 CPC의 수용각도를 나타낸다.

절단형 CPC의 전체 길이는  $L_T$ 는

$$L_T = f \cos(\phi_T - \theta_o) / \sin^2 \frac{1}{2} \phi_T \quad (4)$$

이고, 이론적인 집속비  $t/b$ 는 다음과 같다.

$$t/b = [ (1 + \sin \theta_i) \sin(\phi_T - \theta_i) - \sin^2 \frac{1}{2} \phi_T ] / \sin^2 \frac{1}{2} \phi_T \quad (5)$$

## 2-2 변형 CPC와 난반사 공동으로 구성된 펌핑 캐비티의 최적 펌핑조건 분석

본 연구에서는 적층 다이오드 레이저로 Nd:YAG 결정을 펌핑할 때, CPC(Compound Parabolic Concentrator)와 난반사 공동을 결합시킨 구조 [6]에서 CPC설계변수를 변화시켜 적층 다이오드 레이저의 출력을 Nd:YAG 결정에 효과적으로 분포시키는 CPC구조를 광선추적법[4]을 이용하여 분석하였다. 여기서 CPC는 다이오드 레이저로부터의 출력을 집속시키는 역할을 하며, 난반사 공동은 이렇게 집속된 광선을 분배하는 역할을 한다. 사용된 CPC는 다

이오드 레이저의 방출면의 크기와 CPC의 입구를 맞추기 위하여 입구부분을 절단한 절단형 CPC[7]이다.

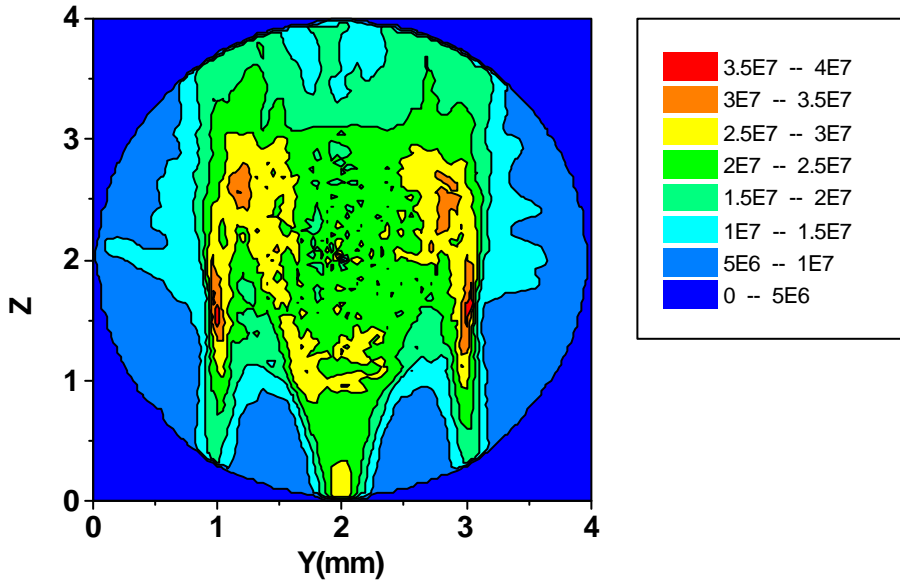
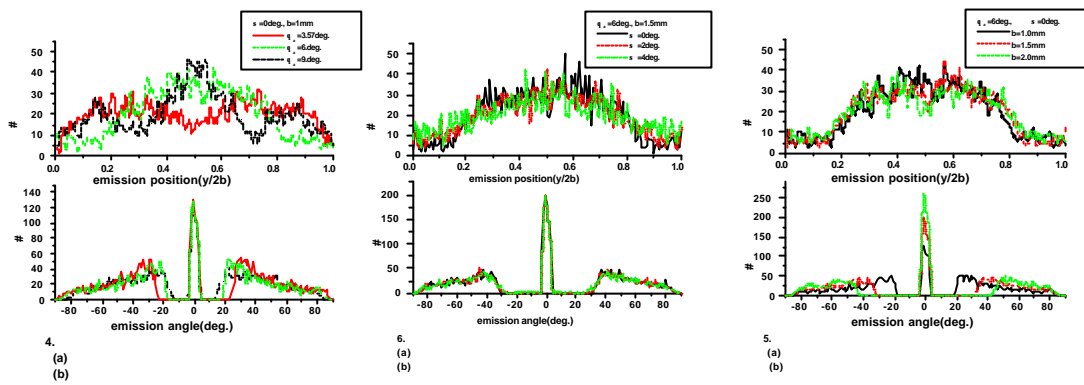
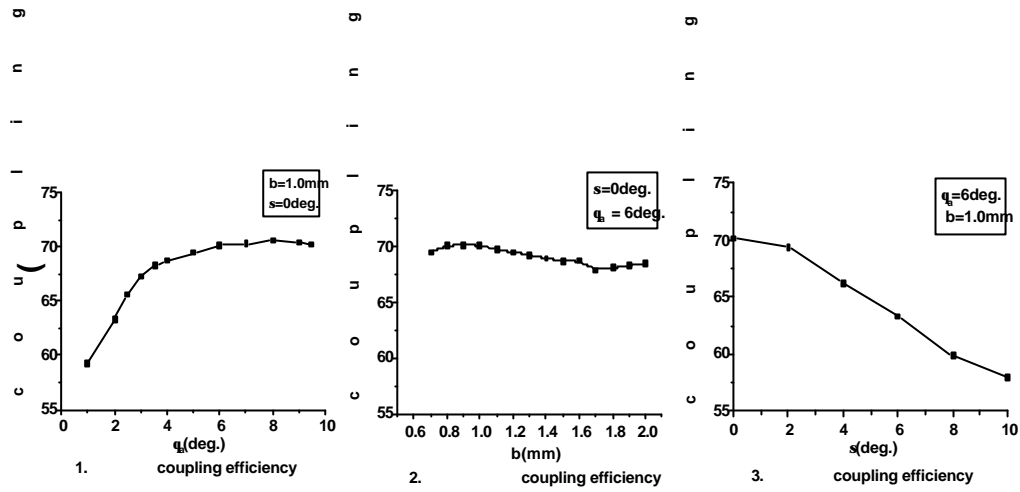
CPC설계변수로 수용각도( $\theta_a$ ), 출구 반쪽길이(b), 모양 오차( $\sigma$ )[7]를 택하여 이들의 변화에 의한 기본 CPC의 변형이 결합 효율과 균일성에 미치는 영향을 광선추적법을 통하여 분석하였다. 여기서 수용각도는 CPC에서 1회 반사된 후 집속될 수 있는 최대 각도를 말하고, 출구 반쪽길이는 CPC출구의 반쪽을 말하며, 모양 오차는 표면의 거칠기에 의해 발생하는 반사 각도 오차의 표준편차이다.

광선추적법에서 사용한 매개변수는 CPC의 반사율 90%, 난반사 공동의 반사율 95.7% [8], 결정의 흡수계수  $0.25 \text{ mm}^{-1}$ , 결정의 반지름 2mm, 다이오드 레이저의 출력 300W, 다이오드 레이저의 최대 입사각도  $3.57^\circ$ 이다.

먼저 설계 변수와 결합 효율과의 관계를 알아보기 위하여, 각각의 설계변수를 변화시키면서 결정에 흡수된 출력을 광선추적법으로 계산해 보았다. 수용각도를 변화시켜보면, 그림1에서처럼 수용각도가 증가할수록 결합 효율이 증가하며 수용각도가 최대 입사각도보다 큰 경우에도 결합 효율이 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 수용각도와 최대 입사각도를 같게 설계하는 기존의 CPC에서와는 달리 수용각도를 최대 입사각도보다 크게 설계하면 결합 효율이 향상될 것임을 알 수 있다. 이것은 입사광선의 가우스 분포에서 최대 입사각도보다 큰 각도의 광선도 집속될 수 있기 때문이다. 출구 반쪽길이를 변화시켜보면, 결합 효율은 그림2에서 보이듯이 극대 극소값을 가지므로 균일성을 고려하면 이들 두 값 사이의 적절한 값을 택해 주어야 할 것임을 알 수 있다. 모양 오차가 증가하는 경우는 집속되지 못하고 되돌아가는 광선이 증가하므로 그림3과 같이 결합 효율이 감소한다.

설계 변수와 균일성과의 관계는 CPC출구에서의 방출위치에 따른 광선의 분포와 방출 각도에 따른 광선의 분포를 조사하여 분석하였다. 수용각도를 변화시켜본 결과, 방출위치에 따른 광선의 분포(그림4(a) 참고)는 수용각도가 작을수록 보다 균일해지고 방출각도에 따른 광선의 분포(그림4(b) 참고)는 서로 유사하므로 수용각도가 작을수록 보다 균일한 이득 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 출구 반쪽길이를 변화시켜본 결과, 출구 반쪽길이가 증가할수록 방출위치에 따른 광선의 분포(그림5(a) 참고)는 모양은 유사하나 더 broad해지고 방출각도에 따른 광선의 분포(그림5(b) 참고)는 출구 반쪽길이가 증가할수록 큰 각도로 방출되는 광선이 상대적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 출구 반쪽길이가 증가할수록 이득 분포가 균일함을 알 수 있다. 모양 오차를 변화시켜본 결과, 모양 오차가 증가할수록 방출위치에 따른 광선의 분포(그림6(a) 참고)는 다소 균일해지고 방출각도에 따른 광선의 분포(그림6(b) 참고)는 유사하므로 모양 오차가 증가할수록 균일성이 향상될 것으로 기대되나 그리 큰 영향은 미치지 못할 것임을 알 수 있다.

결론적으로, 설계 변수는 결합 효율과 균일성에 대하여 서로 반대되는 양상을 보이므로 이들을 절충하여 중간값을 택해야 할 것으로 분석된다. 따라서 수용각도는 최대입사각도인  $3.57^\circ$ 와 설계 가능한 최대값인  $9.5^\circ$ 일 때 값의 중간 값인  $6^\circ$ 로 정하고, 마찬가지로 출구 반쪽길이는 극대값을 갖는 0.9mm와 극소값을 갖는 1.7mm의 중간값인 1.3mm로, 모양 오차는 최대값  $0^\circ$  부근의 값을 취했을 때 최적의 설계가 된다. 결정된 설계변수로 CPC를 설계했을 경우 69%의 결합 효율과 그림7,과 같은 균일성을 얻을 수 있었다.



7.  $\theta_a = 6\text{deg.}$ ,  $b = 1.3\text{mm}$ ,  $\theta_s = 0.5\text{deg.}$

### 2-3. V-형 덕트와 난반사 공동으로 구성된 펌핑 캐비티

다이오드 레이저로 고체 레이저를 펌핑할 때 비결상 광학계를 이용하면 별도의 광학계가 필요하지 않아 비용이 절감되고 효율이 파장 이동에 민감하지 않은 등 많은 장점이 있다. Chang 등은 세 개의 CPC와 난반사 공동으로 이루어진 계로 Nd:YAG rod를 펌 여기방식을 이용하여 40%의 기율기 효율을 얻었다.[1]

본 연구에서는 CPC에 비해 profile이 단순한 V-형 덕트와 난반사 공동으로 구성된 펌핑 캐비티로 Nd:YAG 봉을 펌 여기 할 때 광선추적법을 이용하여 beam profile을 최적화하는 덕트 설계조건을 분석해 보았다. 광선추적법에서 사용한 매개변수는 V-형 덕트의 반사율 90%, 난반사 공동의 반사율 95.7%, 결정의 흡수계수  $0.25 \text{ mm}^{-1}$ , 결정의 반지름 2mm, 결정의 투과율 95%, 다이오드 레이저의 출력 320W 이다. 그림8과 그림9는 각각 수용 각도와 출구 반쪽 길이에 따른 흡수 효율을 계산한 그래프이다.

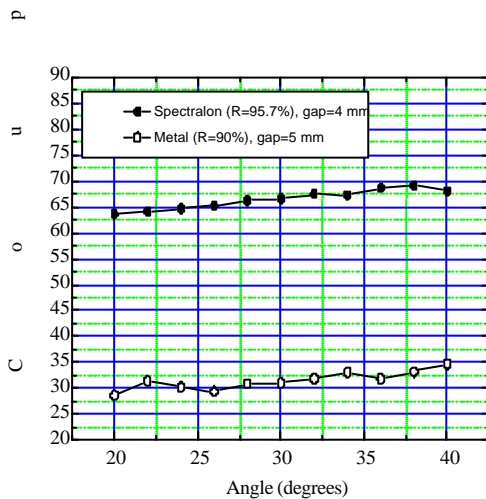


그림8. 수용각도와 흡수 효율과의 관계

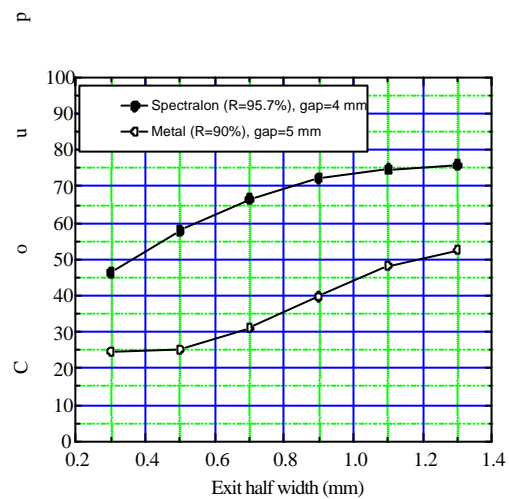


그림9. 출구 반쪽길이에 따른 흡수 효율과의 관계

그림10은 V-형 덕트 출구에서의 위치와 각도에 따른 광선 분포를 나타낸 것으로, 제2절의 결과와 비교해 보았을 때 CPC의 경우 보다 광선 분포가 균일함을 알 수 있다.

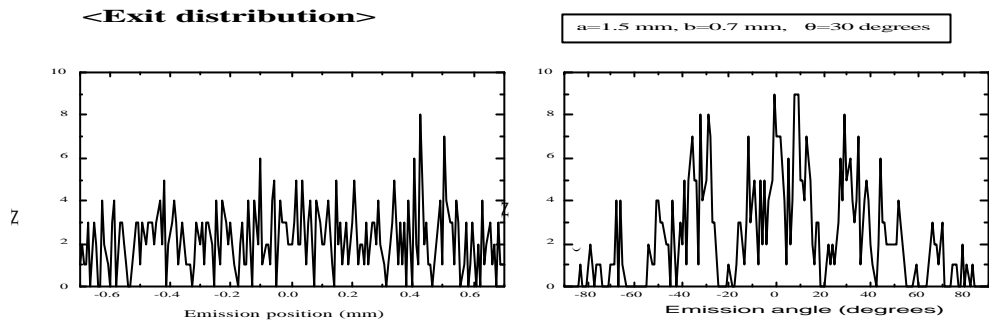
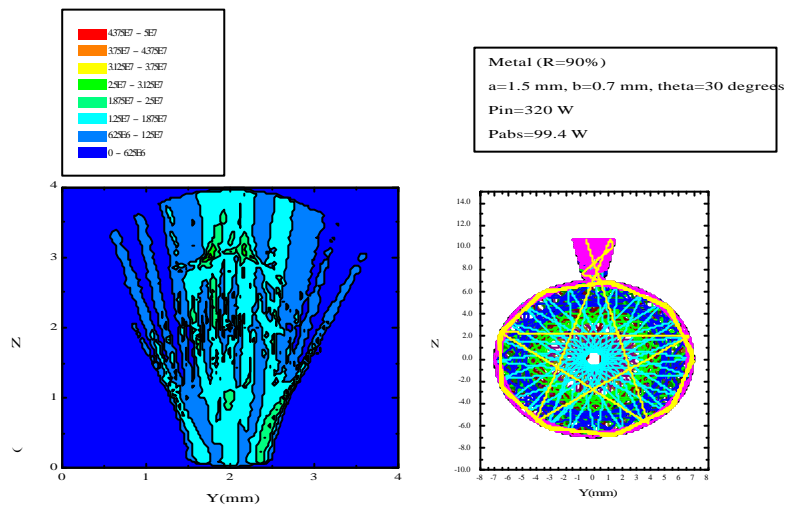


그림10. 출구에서의 위치와 각도에 따른 광선 분포

그림11은 금 코팅된 경우의 흡수분포로서 금 코팅의 경우 반사법칙에 의해 반사되면서 패턴을 형성하여, 봉으로 흡수되지 못하고 봉 주위를 도는 광선으로 인해 흡수 효율이 낮고 등방적이지 못한 흡수분포를 보인다.



E

그림11. 금 코팅된 경우의 흡수분포

그림12는 스펙트랄론 코팅된 경우의 흡수분포로서, 금 코팅된 경우보다 등방적인 분포를 보인다. 이 결과로부터 높은 흡수 효율과 등방적인 흡수분포를 얻기 위해서는 스펙트랄론 코팅이 유리함을 알 수 있다.



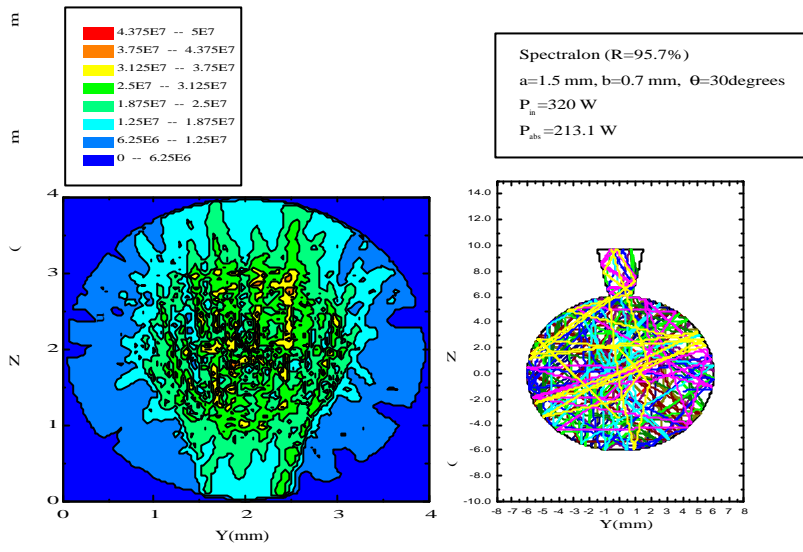


그림 12. 스펙트랄론 코팅된 경우의 흡수분포

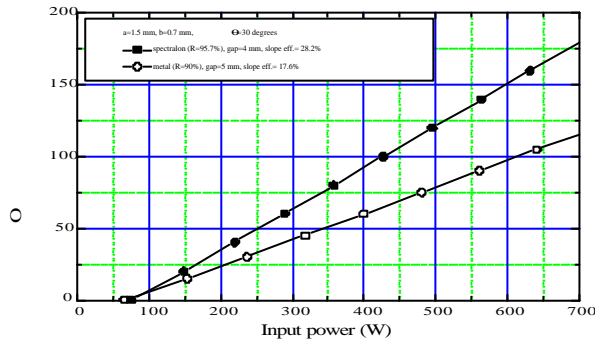


그림 13. 스펙트랄론 코팅된 경우의 출력

매개변수  $a_T=1.5\text{mm}$ ,  $b=0.7\text{mm}$ ,  $\theta_a=30^\circ$  인 스펙트랄론으로 코팅된 펌핑 공동으로 횡 여기한 경우의 흡수분포에 대하여 레이저 출력을 계산해 본 결과 그림 13에서 보듯이 28%의 기울기 효율을 얻었다. 레이저 출력에 대한 자세한 수치 모델링에 대해서는 참고문헌 9에 나타나있다.

### 3. 결론

비결상 광학계를 이용하면 별도의 광학계가 필요하지 않아 비용이 절감되고 효율이 파장 이동에 민감하지 않는 등 많은 장점이 있다. 본 연구에서는 CPC와 V-형 덕트와 같은 비결

상 광학계로 펌핑 캐비티를 구성하고, 먼저 광선 추적 코드를 이용하여 흡수 분포를 구하였으며, 수용각도, 출구 반쪽길이, 모양오차 등을 설계변수로 하여, 흡수 효율을 최적화 할 수 있는 변수를 알아보았다. 또한, 레이저 결정에서의 흡수 분포에 대해서, 작은 이득영역에서 모델링된 레이저 출력에 관한 관계식을 이용하여, 모드에 따른 출력을 계산하였다. 수치 해석적으로 계산해 본 결과, V-형 덕트와 난반사 공동로 이루어진 계로 Nd:YAG rod를 횡여 기방식으로 펌핑한 경우 약 28%의 기울기 효율을 얻었다.

## 참고문헌

1. D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, A. Tünnermann, and H. Schmidt, Appl. Phys. B **58**, 389 (1994)
2. D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, G. Ernst, M. Bode, A. Tünnermann, and H. Welling, Opt. Lett. **20**, 1148 (1995)
3. D. Golla, M. Bode, S. Knoke, W. Schöne, and A. Tünnermann, Opt. Lett. **21**, 210 (1996)
4. R. John Koshel and I.A.Walmsley, Appl. Opt. **32**, 1517 (1993)
5. T. Brand, Opt. Lett. **20**, 1776 (1995)
6. Jim J. Chang, Ernie P. Dragon, Chris A. Ebberts, Issac L. Bass, and Curt W. Cochran, OSA TOPS Vol. 19 Advanced Solid-State Lasers (1998) p. 300
7. W. T. Welford and R. Winston High Collection Nonimaging Optics,(Academic Press, San Diego, 1989)
8. Labsphere, Diffuse Reflectance Coatings and Materials (1997) p. 40
9. R. John Koshel, Optimal Design of Optically Pumped Laser, (UMI dissertation service, 1996)