

# Nd:YAG 레이저의 SHG로 펌핑된 OPO의 Walk-off 출력특성

이용우\*

전남도립담양대학, 광산업기술지원센터

## Walk-off Output Characteristics of OPO Pumped by SHG of Nd:YAG Laser

Yong Woo Yi\*

Provincial College of Damyang, Center for Optic Technology

E-mail : www.damyang.ac.kr

### 요 약

본 연구에서는 광대역 주파수가변 펄스를 얻기 위한 방법으로 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파로 펌핑된 OPO(optical parametric oscillator) 시스템을 구성하였다. 또한, 모의실험을 통해 주파수 가변범위와 900 nm의 출력파장에서 위상정합각을 구하고, walk-off와 펌핑 에너지의 감소가 고려된 전파방정식을 이용하여 OPO 시스템의 출력세기를 계산하였다.

### ABSTRACT

In this paper, we have constructed singly resonant KTP OPO system pumped by 532 nm to obtain broadly frequency tunable pulses. Also we have mathematically simulated frequency tuning range, phase matching angle for 900 nm output and threshold energy, and we calculated output intensity using wave propagation equations for optical parametric oscillator which include walk-off, pump depletion.

### 키워드

OPC 시스템, walk-off, 위상정합각, 제 2고조파

## 1. 서 론

OPO(Optical Parametric Oscillator) 시스템은 단일 파장의 레이저를 비선형 매질에 투과시켜 넓은 파장영역에서 레이저를 생성시키는 시스템으로써 분광학, 반도체 분석장비, 광화학, 그리고 원격계측 등에 널리 응용이 되고있다. OPO는 1965년 미국의 J. A. Giodmaine과 Robert C. Miller가  $\text{LiNbO}_3$ 을 이용하여 0.592  $\mu\text{m}$ 인 펌프 광으로부터 0.97  $\mu\text{m}$  ~ 1.15  $\mu\text{m}$ 까지의 파장 가변영역을 갖는 신호광을 얻은 이래 지금까지 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1]. 1970년대까지 OPO에 관한 연구는 이론적인 접근이 대부분이었으며, 본격적인 시스템의 구현은 80년대부터 활발히 진행되어 왔다. 현재는 400 nm~2000nm의 파장대의 빔을 얻을 수 있는 high energy nano-second pulse OPO[2]나 극 초단의 광원을 이용한 femto-second pulse OPO[3] 등의 OPO시스템들이 발표되어 왔다.

OPO시스템에 이용되는 비선형 매질로는 LBO( $\text{LiNbO}_3$ ), KTP( $\text{KTiOPO}_4$ )와 BBO( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ) 등이 있으며, 최근에는 Lithography 기술의 발달

에 의하여 더 높은 변환효율을 얻을 수 있는 PPLN이나 PPKTP 등의 매질이 개발되어 연구되어 오고 있다.

본 논문에서는 OPO 시스템의 비 선형성에 의해 발생하는 walk-off 효과에 의한 손실을 예측하기 위하여 모의실험을 하였다. Walk-off 효과란 비등방성 결정에서 편광 성분에 따라 굴절률의 차이가 생김에 의해 벗어남 각이 생기는 것을 말하며, 이에 대한 해석은 일반적으로 Runge-kutta 방법[4-8]이나 split-step법[9] 이용되어 왔다. 특히 Smmith는 본 논문과 비슷한 조건의 YAG레이저로 펌핑했을 때 KTP OPO의 출력에너지를 특성을 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 3차원적으로 해석하였다[8]. 최근에는 walk-off 개선을 위한 많은 실험적 연구가 진행되고 있는데 signal광의 공진각을 바꾸어주는 tangential phase matching 방법[10]이 있다.

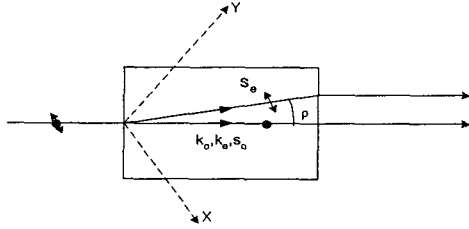


그림 1. KTP 결정 안에서 펌프의 포인팅 벡터와 주파수벡터가 벗어난 모습

다른 하나는 발달한 lithography 기술을 이용한 것인데, 광축이 반대방향인 아주 얇은 결정의 박막들이 계속 교차되도록 배열하는 periodically poled 이라는 결정을 이용한 quasi-phase matching 기법[11] 등이 있으며, 이 외에도 많은 연구가 진행되고 있다.

## II. Walk-off 이론과 모의실험 알고리즘

### 2.1 Walk-off 이론

비선형 물질에서는 광축과 광파의 파수 벡터가 이루는 평면을 주평면이라 한다. 주평면과 평행한 편광을 가진 광선을 정상광선(ordinary beam) 이라 하고 주평면과 수직인 편광을 가진 광선을 이상광선(extraordinary beam)이라고 한다.

정상광선의 굴절률은 진행방향과 관계가 없으나, 그림 1.에서 나타난 것과 같이 이상광선의 굴절률은 진행방향에 따라서 변하게 된다. 이때, 정상광선과 이상광선의 굴절률 차  $\Delta n$ 을 복굴절(birefringence)이라고 하며, 복굴절은 광축을 따라 진행할 때가 최소이고 광축에 수직일 때 최대가 된다.

광축에 수직인 평면이 있는 정상광선과 이상광선의 굴절률을 주값(principal value)이라고 하며  $n_o$ 와  $n_e$ 로 나타낸다. 일반적으로 이상광선의 굴절률은 광축과 파수벡터  $k$  사이의 각으로 표현하며, 방위각(azimuthal angle)  $\theta$ 에 의존하지 않는다.

이상광선의 굴절률은 아래와 같은 식으로 주어진다.

$$n_{e(\theta)} = n_o \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + (n_o/n_e)^2 \tan^2 \theta}} \quad (1)$$

그리고, 그때의 복굴절 각은 다음과 같다.

$$\Delta n(\theta) = n_o - n_{e(\theta)} \quad (2)$$

평면파가 결정을 지날 때 파수벡터  $k$ 의 진행방향과 에너지 벡터( $s$ )의 진행방향은 일반적으로 일치하지 않는다. 위의 복굴절현상에 의하여 아래의 각 만큼 벗어남이 일어나게 되며 이때, 이 값을 walk-off angle이라 하고, 그 값은 식 (3)과 같다.

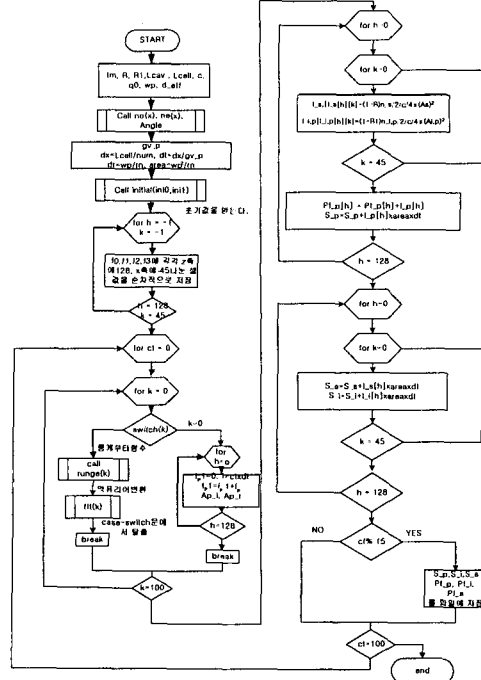


그림 2. 모의실험 알고리즘

$$\rho(\theta) = \tan^{-1}[(n_e/n_o)^2 \tan \theta] \mp \theta \quad (3)$$

위의 부호는 음의 결정이고 아래는 양의 결정의 경우이다. 그림 1은 복굴절에 의하여 walk-off 각 만큼 포인팅 벡터와 파수벡터가 벌어진 모습을 보여주고 있다.

### 2.2 모의실험 알고리즘

맥스웰 방정식으로부터 유도된 OPO 시스템의 pump, signal과 idler의 파동방정식은 아래 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial A_j(s_x, s_y, s_z)}{\partial z} = -i \left[ \frac{2\pi^2}{k_j} (s_x^2 + s_y^2) + 2\pi s_y \tan(\rho_j) \right] \times A + \frac{iP_j}{\cos^2 \rho} \quad (4)$$

그리고 여기에 따른 pump, signal과 idler의 에너지 전달을 나타내는 편광벡터 P값은 다음 식(5), (6)과 (7)과 같다.

$$P_p(x, z, t) = \frac{d_{eff} \omega_p}{c n_p} A_s(x, z, t) A_i(x, z, t) \exp(-i\Delta k z) \quad (5)$$

$$P_s(x, z, t) = \frac{d_{eff} \omega_p}{c n_p} A_p(x, z, t) A_i(x, z, t) \exp(-i\Delta k z) \quad (6)$$

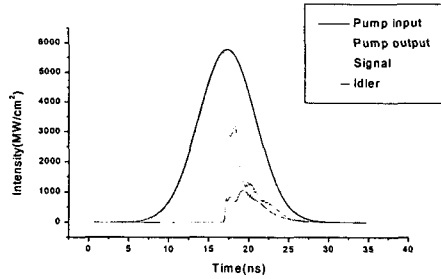


그림 3. Walk-off를 고려한 OPO의 시간에 따른 출력특성.

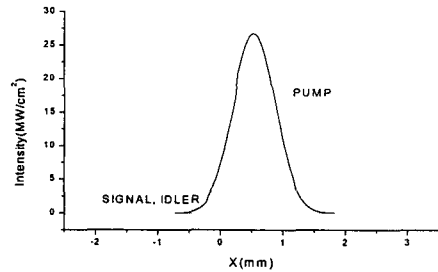


그림 4. t=10 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양.

$$p_s(x, z, t) = \frac{d_{eff}\omega_p}{cn_p} A_p(x, z, t) A_s(x, z, t) \exp(-i\Delta k z) \quad (7)$$

위의 방정식을 그림 2와 같은 알고리즘을 이용하여 해석하였으며, 먼저 미분방정식을 x축에 대해서 아래의 식(8)과 (9)에 대입하여 Fourier 변환을 하였다.

$$A_j(s_x, z, t) = \int A_j(x, z, t) \exp(-2i\pi s_x x) dx \quad (8)$$

$$A_j(s_x, z, t) = \int P_j(x, z, t) \exp(-2i\pi s_x x) dx \quad (9)$$

그리고 적분을 하기 위하여 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용해 (t+Δt, z+Δz)에 대해 적분 값에 근사 시킨 후 다시 x축에 대하여 Fourier 역 변환을 하였다. 그 후 얻어진 적분 값으로부터 횡단면의 signal, idler와 pump에 대한 각각의 강도분포를 계산하고, 그 값들을 시간에 따라 적분하여 시간에 대한 강도분포를 계산하고, 그래프로 표현하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Walk-off 효과를 고려한 경우의 출력특성

Walk-off를 고려한 경우의 결과는 그림 3과 같으며, 시간에 따른 pump, signal, idler의 출력 모양과 입력 모양을 함께 나타낸 것이다.

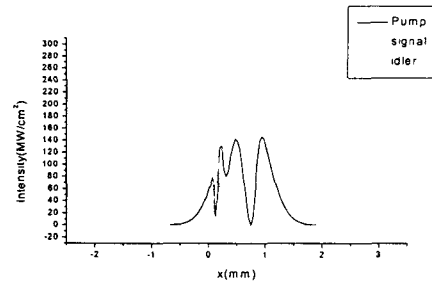


그림 5. t=17.5 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양

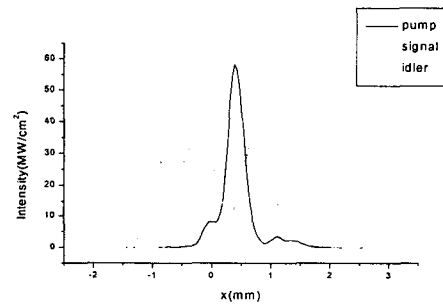


그림 6. t=20.6 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양.

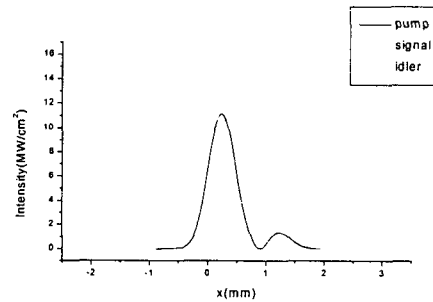


그림 7. t=25 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양.

총 계산시간은 35 ns이고, 입력된 펌프광은 17.5 ns에서 최대값을 가지며, 전반치폭은 10 ns이다. Signal과 idler 광은 16.5 ns에서 발진되고 이때 펌프 광은 고갈되기 시작한다. 공진기의 구성에서 signal 광은 공진되고, idler 광은 투과되도록 구성하였다. 따라서, signal 광은 공진기 내에서 Q 값이 점점 높아지게 되어 18 ns에서는 idler보다 높은 출력을 갖게 된다.

그림 4는 특정시간에 출력되는 광들에 대한 횡단면을 나타낸 것으로 10 ns 일 때 출력된 강도 분포이다. Signal과 idler 광이 발생되기 전이라 펌프의 에너지 전달이 거의 일어나지 않았음을 알 수 있다.

17.5 ns에서의 세 개의 광의 횡단면을 나타낸 그림 5에서 16 ns일 때 signal과 idler가 발견되는 것을 볼 수 있다. 이때까지는 idler가 signal보다 높은 강도를 가지고 있다. 펌프 광의 에너지가 signal과 idler로 전달됨으로써 idler 와 signal 광의 최고 값 부근에서 펌프의 강도가 급격히 감소된 것을 볼 수 있다. 이 때, signal과 idler 광은 x=0 중심으로 최고 값이 출력되지만, 펌프 광은 약 0.55mm 이동했음을 알 수 있다. 이 현상으로 펌프 광에서 signal과 idler 광으로의 완전한 에너지 전달이 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6에서 볼 때, signal 광의 이득이 늘어남에 따라 idler와 펌프의 출력 강도를 넘어서게 된다. 그림 6의 경우에서 20.6 ns때 pump의 강도가 갑자기 증가하게 되는데 이것은 signal과 idler 광으로부터 펌프로의 역변환이 일어나고 있음을 알 수 있다. Signal과 idler 광의 중간부분이 소멸하며 펌프로 변환되기 때문에 고갈되었던 펌프의 중간이 다시 생겨나게 되어 불룩한 모양을 보이고 있다.

그림 7은 25 ns에서 각각의 빔의 횡단면을 나타낸 것으로, 그림 6에서의 증가된 펌프 광의 강도는 급격하게 감소하여, signal 광의 강도보다 작아지게 되어 그림 3의 빔의 꼬리부분처럼 결국에는 signal 광만이 존재함을 알 수 있다.

### 3.2 Walk-off효과를 고려하지 않은 경우의 출력 특성

그림 8은 walk-off 효과를 고려하지 않은 경우의 시간에 따른 signal, idler, 펌프의 출력모양과 입력펌프의 모양을 나타낸 것이다. 펌프 광이 고갈되는 시점은 15 ns로 walk-off 효과를 고려한 경우보다 더 빠름을 알 수 있다. 이것은 walk-off가 고려되지 않음으로써 펌프 광이 signal과 idler로 에너지 전환이 더 빨리 일어났음을 알 수 있다. 그리고 역변환 현상도 고려하였을 때보다 더 빨리 일어났고 더 많은 양의 역변환 반응이 일어났음을 알 수 있다. 그림 9에서 보면 그림 5의 경우보다 펌프광의 에너지가 더 큰 값을 알 수 있다.

이러한 현상 역시 walk-off 효과를 무시함으로써 펌프와 다른 광들의 반응면적이 넓어짐으로 발생하게 된다.

표 1. Walk-off에 대한 출력에너지의 비교표(mJ)

	walk-off를 고려한 경우	walk-off를 고려하지 않은 경우
pump	13.3	12.6
signal	4.7	5.2
idler	1.9	2.0

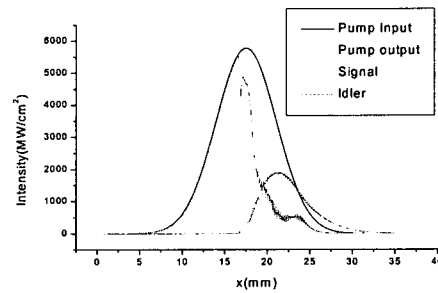


그림 8. Walk-off를 고려하지 않은 경우 시간에 따른 출력모양과 펌프의 입력모양.

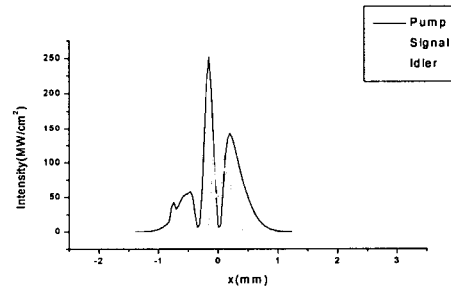


그림 9. t=17.5 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양.

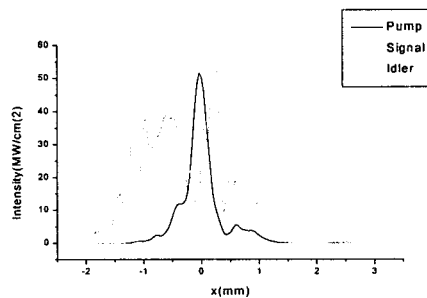


그림 10. t=21.7 ns에서의 펌프, signal, idler 출력의 횡단면 모양.

그림 10에서 볼 수 있듯이 25 ns 이후에는 펌

프와 idler광의 강도가 현저하게 감소하고, 35 ns 이후에는 signal 광만이 발진되고 있음을 알 수 있다.

위의 두 경우의 펌프, signal, idler의 출력 에너지를 표 1에 나타내었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 KTP OPO의 파장변환 특성에 대한 모의 실험을 통한 이론적 해석을 하였다. 이 모의 실험을 통하여서는 532 nm로 펌핑 한 경우에 signal은 0.58~1.03  $\mu\text{m}$ 까지이고, idler는 1.9~6.4  $\mu\text{m}$ 까지의 넓은 영역에서 파장변환을 보였다. 그리고 유효 비선형 계수는 4.92~7.56 pm/V 만큼의 높은 비선형계수 값을 가지며, 실험에서는 변환효율이 더욱 높을 것으로 예상되지만 각도에 대한 제한범위가 있기 때문에 모의실험에서와 같이 넓은 파장분포는 얻을 수 없을 것으로 보인다.

OPO 시스템에서 펌프의 고갈과 walk-off, 공진 조건들을 고려하여 OPO의 파동방정식을 유도하고, FFT와 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 동작특성을 해석하였다. Walk-off 효과에 의한 펌프광의 이동(shift)현상이 관찰이 되었고, walk-off 효과에 의하여 반응공간이 축소에 따라 역변환이 감소하고, signal과 idler로의 에너지 변환 역시 감소함을 알 수 있었다. 또한, 공진기 구성에서 signal 광만 고려하였기 때문에 15 ns나 16 ns 근처에서 signal과 idler 광의 강도분포가 늘어나는 것을 관찰할 수 있었다. 결정의 길이를 적당히 조절하여 역변환되는 시점에서의 변환을 막아주면 더욱 높은 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] J. A. Giordmaine and Rogert C. Miller, Phys. Rev. Lett. 14, 973 (1965).
- [2] S. G. Anderson. Laser Focus World. 16, (1993).
- [3] M. himazu, Photonics Spectra 26, 128, (1993).
- [4] A. Fix and R. Wallenstein, J. Opt. Soc. Am. B 13, 2484 (1996).
- [5] C. Sheng and A. E. siegman, Phy, Rev. A 21, 599 (1980).
- [6] Nishijawa and N. Useugi, J. Appl. Phys. 77, 494 (1995).
- [7] Nishijawa and N. Useugi, Opt Comm. 124, 512 (1996).
- [8] V. Smith, W. J. Alford, T. D. Raymond, and M. S. Bowers, J. Opt. Soc. Am. B 12, 2253

- (1995).
- [9] A. Fleck and M. D. Feit, J. Opt. Soc. Am. B 73, 920 (1983).
- [10] M. J. L. Milton et al, Opt. comm., 87, 273(1992).
- [11] W. Boyd., Nonlinear Optics, Academic Press, Sandiego (1992).