

재생증폭기의 증폭특성에 관한 수치해석*

김남희 · 김병태

청주대학교 이공대학 광학공학과

(1994년 1월 17일 받음)

재생증폭기에서의 gain narrowing 현상, 비선형현상, 에너지 포화상태 등의 증폭특성 해석 및 최적설계를 위한 시뮬레이션 코드를 개발하였다. 재생증폭기에서 gain narrowing 현상을 줄이기 위해서는 증폭매질의 중심파장에 일치하는 대칭인 펄스를 이득대역폭이 넓은 매질에 입사시켜야 한다. 재생증폭기의 특성을 최대한 활용할 수 있는 증폭매질로는 이득대역폭이 넓고, 비선형굴절율이 작으며, 고에너지를 얻을 수 있는 Ti:Sapphire가 최적매질로 평가되었고, 재생증폭기 설계시 중요한 파라미터에 대하여 해석하였다.

I. 서 론

초단펄스 고출력 레이저시스템은 초고속분광, 초고속계측, 광스위치 등의 분야에는 물론 레이저생성 플라즈마에 의한 연 X-선 발생으로 반도체 미세가공의 X-선 리소그래피,^[1] 생물, 의학 등의 X-선 현미경^[2]을 비롯 X-선 레이저개발^[3]에도 아주 중요한 역할을 하고 있다. 이에 재생증폭기(regenerative amplifier: RA)를 이용하는 CPA(chirped pulse amplification)법^[4-6]의 소형 레이저시스템에서 Terawatt(10^{12} W)급의 고출력 레이저광 발생에 대한 연구가 급속도로 진행되고 있다.

일반적으로 고출력 레이저펄스는 발진기로부터의 레이저광을 여러 단의 증폭기를 이용하여 증폭시키는 MOPA(master oscillator power amplifier)방식^[7]에서 얻게 된다. 그러나 이 방식은 입력펄스가 증폭기를 한번만 통과하기 때문에 증폭매질에 저장된 에너지를 충분히 추출해 낼 수 없으며, 고출력을 얻기 위해 많은 증폭단이 필요하게 되어 레이저시스템이 커지고 건설 단가가 많이 드는 등의 문제점이 있다.^[4,8] 이에 비해 재생증폭기를 이용하는 방식은 레이저시스템을 소형으로 만들 수 있을 뿐만 아니라 레이저비임이 증폭매질을 여러 번 왕복하므로 에너지 추출효율이 높고, $\sim 10^6$ 정도의 고이득에 안정된 출력펄스, 고반복율을 얻을 수 있다.^[9,10] 재생증폭기는 X-선 발생^[11] 및 핵융합용 레이저시스템의 전치

증폭단,^[12] CPA법을 이용한 고강도 레이저시스템의 증폭기^[13,14] 등에 이용된다.

재생증폭기의 출력특성^[15-17]은 재생증폭기에서 일어나는 gain narrowing 현상, 비선형현상 및 에너지 포화상태 등에 의해 제한되며, CPA법에 이용될 경우에는 펄스압축에 커다란 영향을 미치게 된다. 고이득으로 인한 gain narrowing 현상은 출력 스펙트럼형태를 변형시키고 출력스펙트럼폭과 펄스폭을 줄여 펄스압축에 의해 초단펄스를 얻는데 제한을 주며, 펄스폭이 좁아지므로 첨두파워가 높아져서 재생증폭기를 구성하는 광학소자와 증폭매질에 손상을 주므로 이 현상을 억제하는 것이 필요하다. 매질의 비선형굴절율과 레이저비임 강도의 결합에 의해 나타나는 자기집속현상과 펄스의 시·공간적인 형상의 변형을 가져오는 비선형현상은 재생증폭기의 광학소자와 증폭매질에 손상을 줄 수 있고, 비임질을 저하시키므로 이 현상 역시 고려해야 한다. 재생증폭기의 증폭매질로부터 많은 에너지를 추출하고 매질을 효과적으로 이용하기 위해서는 낮은 첨두출력을 유지해가며 $\sim 10^6$ 정도의 고이득에 증폭매질의 포화 fluence 정도까지 증폭시켜야 하기 때문에 매질의 포화 fluence와 비선형현상과의 관계도 해석되어야 한다.

본 논문에서는 재생증폭기의 증폭특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 결과로 gain narrowing 현상, 비선형현상이 출력펄스에 미치는 영향, 이를 최소화하기 위한 최적조건, 에너지 포화상태 등에 대하여 연구한 것을 기술한다.

* 본 연구는 1993년도 한국과학재단 연구비지원(931-02 00-015-2)으로 수행된 것임.

II. 본 론

재생증폭기의 증폭특성은 재생증폭기에서 일어나는 gain narrowing 현상, 자기집속 등의 비선형현상 및 에너지 포화상태 등에 의존하며, CPA법에 이용되는 경우 펄스압축에 의한 초단펄스 발생에 영향을 미친다.

본 연구에서는 일본 오사카대학 레이저핵융합 연구소에 설치되어 있는 소형 고강도 Nd:Glass 레이저시스템 중에 재생증폭기 부분을 기준모델로 삼았으며, 그림 1에 그 구성도를 나타낸다. 재생증폭기는 100%와 50%의 반사율을 갖는 두 장의 거울, 두 개의 증폭매질, 두 개의 포켈스셀, λ/2판, λ/4판, 오목렌즈, 편홀로 구성된다. Nd:YAG 발진기로부터의 푸우리에변환 한계 펄스에 근접하는 레이저펄스는 편광보존 단일모우드 광섬유에서의 자기위상변조와 정(正)의 군속도분산에 의해 chirp되고, 편광자에 의해 선편광된 후 재생증폭기 안으로 주사되어 ~10⁶ 정도의 이득까지 충분히 증폭된 다음 포켈스셀 PC 2의 편광제어에 의해 출사된다.

재생증폭기로 입력되는 펄스의 형태는 재생증폭기에서의 증폭특성에 영향을 미친다. 입력되는 chirped 펄스 E_m(t)는^[5]

$$E_m(t) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^{2m}\right] \exp\left\{i\left[\frac{1}{2}b\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^2 + \phi_{NL}(t)\right]\right\} \quad (1)$$

로 표현할 수 있으며, 슈우퍼가우시안 형태를 갖게 된다. 입력펄스의 진폭을 E₀라 하면^[16]

$$E_0^2 = \frac{8\pi I_0}{nc} = \frac{32E_{eng}}{ncd^2\tau_0} \quad (2)$$

이며, 입력펄스가 시간에 대해 선형적으로 변하는 진동수 ω_m(t) ≡ ω₀ + 2bt를 가질 때, 이 펄스는 chirp되었다고 말하며, 선형 chirp의 양 b는^[7]

$$b = \frac{\Delta\omega_0 \tau_0}{2} = \frac{\pi}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_0 \Delta\tau_0 \quad (3)$$

이고, 비선형 진동수 chirp φ_{NL}(t)는^[19]

$$\phi_{NL}(t) = u\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^3 + v\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^4 \quad (4)$$

으로 주어진다. 여기에서 I₀는 입력펄스의 강도, n은 광섬유 코어의 굴절율, c는 광속도, E_{eng}는 입력펄스의 에너지, d는 입력 레이저비임의 직경, Δλ₀는 입력펄스의 스펙트럼폭, τ₀는 입력펄스의 펄스폭, λ₀는 입력펄스의

중심파장, ω₀는 입력펄스의 중심진동수, m은 가우시안 차수로서 입력펄스의 상승시간 τ_e에 의해 결정되며 m ≡ τ_e/τ₀^[19]의 관계가 있다. φ_{NL}(t)의 3차항은 입력 스펙트럼형태의 비대칭성, 4차항은 입력 스펙트럼형태의 비선형성 관계를 나타내며, u와 v에 의해 입력 스펙트럼형태를 변화시킬 수 있다. 입력 펄스 E_m(t)의 푸우리에변환에 의해 스펙트럼 E_m(ω)가 계산된다.

재생증폭기에서 gain narrowing 현상, 자기집속을 포

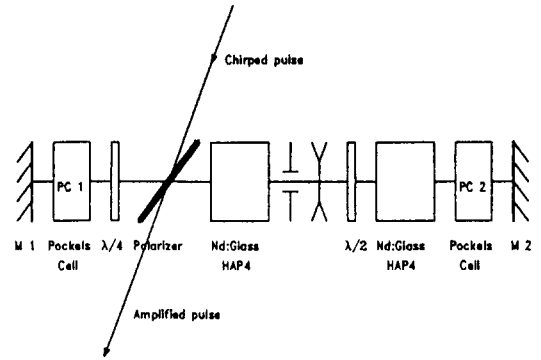


그림 1. 재생증폭기의 구성도

표 1. 입력펄스의 특성.

Input Parameters		Input data
Energy [nJ]	E _{eng}	1.0
Spectral bandwidth [nm]	Δλ ₀	3.7
Pulsewidth [ps]	τ ₀	350
Gaussian order	m	20
Beam diameter [mm]	d	1.9
Center wavelength [nm]	λ ₀	1052
Linear chirp amount	b	1103

표 2. 재생증폭기를 구성하는 광학소자들의 손실.

Optical Components	Loss(%)
Mirror [M1]	0.9
Mirror [M2]	50.0
Pockels Cell [PC1, PC2]	4.0
λ/2 plate	0.4
λ/4 plate	0.2
Lens	0.5
Polarizer	3.0
Pinhole(diameter 1.8 mm)	11.0

표 3. 증폭매질의 광학적 특성.

Properties	Nd:YAG	HAP4	Ti:Sapphire
Nonlinear refractive index ($\times 10^{-13}$)	4.09	1.25	1.23
Refractive index (at λ_0)	1.829	1.533	1.76
Center wavelength [nm]	1052	1052.7	700-1100
Fluorence linewidth [nm]	0.45	27	122
Saturation fluence [J/cm^2]	0.44	6	0.9
Stimulated emission cross section ($\times 10^{-20} cm^2$)	65	3.6	28
Fluorence lifetime [μs]	230	230	3.2

합하는 비선형현상 및 에너지포화 등의 증폭특성을 해석하기 위해 시뮬레이션에 사용한 파라미터를 표 1, 표 2 및 표 3에 나타낸다. 표 1은 광섬유에 의해 chirp된 입력펄스의 특성이다. 표 2는 재생증폭기를 구성하고 있는 광학소자들에 의한 pass당 손실량으로 측정치이다. 표 3에 증폭매질로 사용된 Nd:YAG, 인산염 레이저글라스(HAP4:HOYA) 및 Ti:Sapphire의 광학적 특성을 나타낸다. 증폭매질의 중심파장 ω_0 와 선폭 $\Delta\omega_0$ 는 gain narrowing 현상에, 증폭매질의 비선형굴절률 n_2 는 비선형 현상에, 포화 fluence J_s 는 출력에너지에 영향을 미친다.

입력펄스가 재생증폭기에서 k 회 왕복 증폭한 후의 출력스펙트럼 $E_{out}(\omega)$ 는^[6]

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) [1 - R]^k G(\omega)^k \exp[i\phi(\omega)L] \quad (5)$$

으로 표현될 수 있으며, 이 식은 포화현상으로 인한 스펙트럼변형을 고려하지 않을 경우 상당히 정확한 결과를 준다. pass당 증폭매질의 이득 $G(\omega)$ 는^[20]

$$G(\omega) = G_0 \exp\left[\frac{(\Delta\omega/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Delta\omega/2)^2}\right] \quad (6)$$

이며, 위상천이계수 $\phi(\omega)$ 는^[20]

$$\phi(\omega) = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} \ln \frac{G(\omega)}{L} \quad (7)$$

로 주어진다. 여기에서 R 는 재생증폭기를 구성하는 pass당 광학소자들의 총손실, k 는 입력펄스가 재생증폭기를 왕복하는 회수, L 은 증폭매질의 길이, ω_0 는 증폭매질의 중심진동수, G_0 는 ω_0 에서의 이득, $\Delta\omega$ 는 증폭매질의 이득대역폭 그리고 ω 는 입력펄스의 진동수이다. 재생증폭기로부터의 출력스펙트럼 $E_{out}(\omega)$ 를 역 푸우리에 변환하면 출력펄스 $E_{out}(t)$ 가 계산된다. 그림 2와 그림 3은 인산염 레이저글라스 HAP4로 구성된 재생증폭기에서 pass당 광학소자들의 총손실이 24%이고, 증폭매질의 이득이 1.7인 경우, 재생증폭기를 왕복하는 회수에 따른 출력스펙트럼과 펄스의 변형과정을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 입력 스펙트럼형태를 실험에서와 동일한 형태의 스펙트럼을 입력시켜, 왕복회수에 따른 스펙트럼변화를 나타낸 것이다. 증폭매질의 중심파장이 1052.7 nm이므로, 왕복회수가 증가할수록 증폭되는 펄스의 스

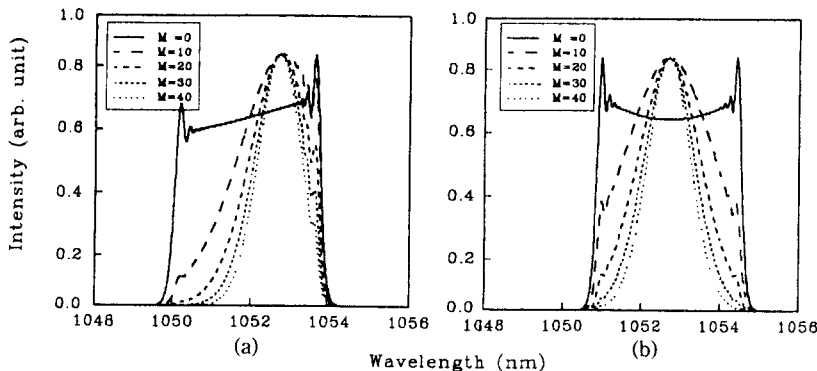


그림 2. 인산염 레이저글라스 HAP4로 구성된 재생증폭기에서 왕복회수에 따른 출력스펙트럼 (a) 입력 스펙트럼형태를 실험결과에 맞출 때의 출력스펙트럼 (b) 중심파장이 증폭매질의 중심파장과 일치하고, 입력 스펙트럼형태가 대칭일 때의 출력스펙트럼.

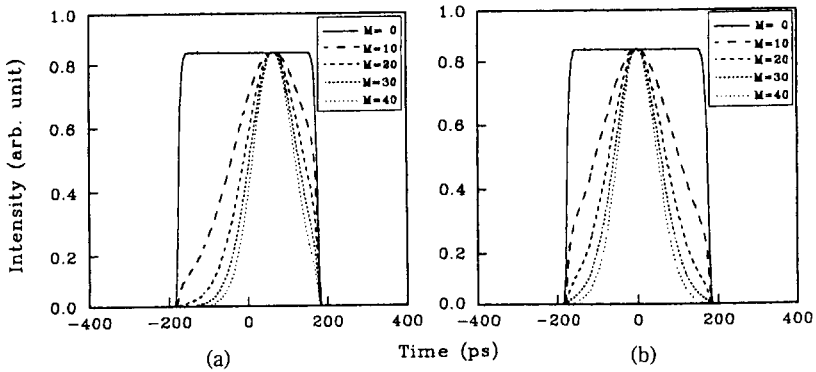


그림 3. 인산염 레이저글라스 HAP4로 구성된 재생증폭기에서 왕복회수에 따른 출력펄스(그림 2의 역 푸우리에변환에 의한 결과)

펙트럼 중심은 1052.7 nm로 이동하며, 입력펄스의 중심 파장인 1052 nm와의 불일치와 gain narrowing 현상에 의해 출력스펙트럼과 펄스가 변형되고 출력스펙트럼폭과 펄스폭이 좁아진다. 그림 2(b)는 (a)와 동일한 조건에서 입력펄스와 증폭매질의 중심파장을 일치시키고, 대칭인 펄스를 재생증폭기로 입력시킬 때, 왕복회수에 따른 출력스펙트럼의 변화를 나타낸 것으로서 대칭인 스펙트럼을 얻을 수 있다. 재생증폭기로부터의 펄스를 회절격자쌍에 의해 압축하여 초단펄스를 얻고자 할 때, 압축펄스의 특성은 압축기로 입력되는 펄스와 관련되므로 대칭인 압축펄스를 얻기 위해서는 재생증폭기로부터 대칭인 펄스를 얻을 필요가 있다. 그림 3은 그림 2의 스펙트럼을 역 푸우리에변환한 것으로서 왕복회수에 따른 출력펄스의 변화를 보여준다. 그림 3에서 출력펄스의 형태는 스펙트럼과 거의 같으며 입력 스펙트럼형태가 대칭이고 중심파장이 증폭매질의 중심파장과 일치할 때 대칭인 펄스를 얻을 수 있다. 그림 4는 동일한 조건에서 증폭매질이 Nd:YAG, 인산염 레이저글라스 및 Ti:Sapphire일 경우 왕복회수에 따른 출력스펙트럼폭의 변화를 계산한 결과이다. 일점쇄선은 증폭매질이 인산염 레이저글라스인 경우로 측정된 데이터를 입력시켜 시뮬레이션한 결과이고, ●는 측정된 결과이다. 30회 왕복 이전에는 계산치와 실험치가 비교적 일치하는 반면에 30회 이후부터 큰 차이가 있게 되는데, 이것은 실험에서 이득포화를 포함하는 비선형현상에 의해 스펙트럼폭이 늘어나는 반면에 식 (6)의 이득 $G(\omega)$ 에는 이 현상에 관련된 factor가 들어가 있지 않기 때문인 것으로 생각된다. Nd:YAG를 증폭매질로 할 경우, Nd:YAG의 이득대역폭이 두 매질에 비하여 좁기 때문에 gain narrowing 현상이 현저하게 일어나 10회 왕복 전에 출력스펙트럼폭이 급

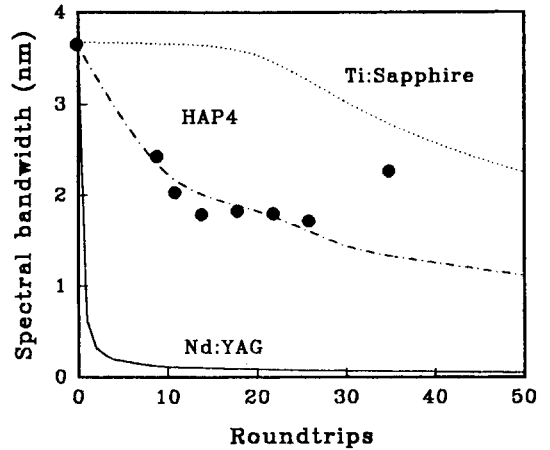


그림 4. Nd:YAG, HAP4 및 Ti:Sapphire로 구성된 재생 증폭기에서 왕복회수에 따른 출력스펙트럼폭 변화.

격히 줄어들고 10회 이상 왕복 후에는 거의 변화가 없다. Ti:Sapphire일때, 700~1100 nm 범위 내에 있는 어떤 발진기의 파장과도 일치시킬 수 있는 파장가변 매질이기 때문에 1052 nm를 중심파장으로 이용하였다. 이득대역폭이 다른 레이저매질에 비해 넓고 파장가변 매질이기 때문에 스펙트럼폭 감소는 적게 일어남을 알 수 있다. 그림 5는 동일한 조건에서 증폭매질이 Nd:YAG, 인산염 레이저글라스 및 Ti:Sapphire일 경우 왕복 30회에서의 출력스펙트럼이다. Nd:YAG는 출력스펙트럼폭이 좁기 때문에 압축에 의한 초단펄스 발생이 어려울 것이며, 출력펄스폭도 워낙 좁기 때문에 첨두파워가 증가해 증폭매질과 광학소자에 손상을 줄 수 있다. Ti:Sapphire는 이득대역폭도 넓고 파장가변 매질이기 때문에 증폭매질

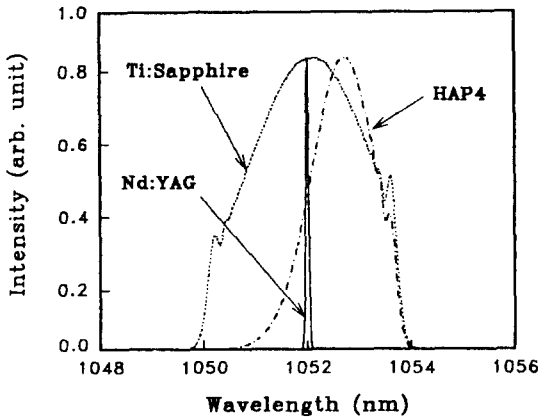


그림 5. Nd:YAG, HAP4 및 Ti:Sapphire로 구성된 재생 증폭기에서 왕복 30회에서의 출력스펙트럼.

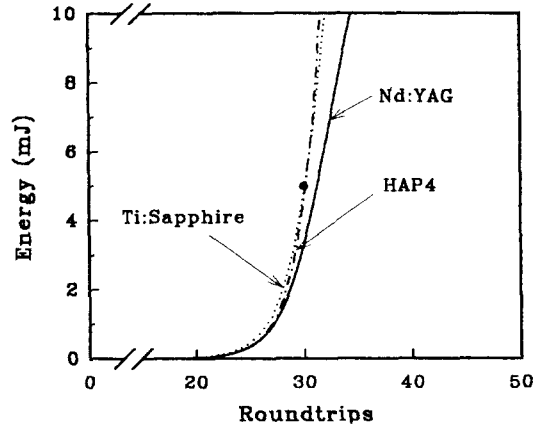


그림 6. Nd:YAG, HAP4 및 Ti:Sapphire로 구성된 재생 증폭기에서 왕복회수에 따른 출력에너지.

의 중심파장을 입력펄스의 중심파장과 일치시킬 수 있으며, 중심파장 불일치에 따른 스펙트럼폭 감소도 없고, 대칭인 출력펄스를 얻을 수 있어, 재생증폭기를 이용한 CPA법에 가장 적합한 매질로 판단된다.

증폭매질로 입사하는 레이저비임의 강도에 따른 굴절율 변화에 의해 일어나는 자기집속현상과 펄스의 시·공간적인 형상의 변형을 가져오는 비선형현상은 재생증폭기의 광학소자와 증폭매질에 손상을 줄 수 있고, 비임질을 저하시킨다. 이것은 B 계수 계산에 의해 예측될 수 있으며,

$$B = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_0^L \gamma(z) dz = \frac{8\pi^2 \times 10^7}{\lambda_0 c} \int_0^L \frac{n_2}{n_0} I(z) dz \quad (8)$$

에서 구할 수 있고, 일반적으로 5이하를 유지하는 것이 바람직하다.^[7] 여기에서 n_0 는 매질의 중심파장 λ_0 에서의 굴절율이다. B 는 레이저강도에 의존하며, 비선형매질 내에서 거리 $z=0$ 일 때의 레이저비임과 $z=L$ 일 때의 높은 강도를 갖는 레이저비임 사이의 위상차를 나타낸다. B 계수는 매질의 비선형굴절율과 증폭기에서의 레이저강도에 비례하므로 증폭매질에서의 비선형현상을 줄이기 위해서는 비선형굴절율이 작은 매질을 선택해야 하며, 증폭기 내에서 레이저비임의 강도를 낮게 유지해야 한다. 동일한 입력과 증폭기 조건에서 증폭매질만 달리하여 왕복 50회까지 B 계수를 계산한 결과, Nd:YAG는 0.49, 인산염 레이저글라스는 1.45, Ti:Sapphire에서는 0.09가 되어 현재 구성된 재생증폭기에서는 비선형현상에 의한 효과는 고려하지 않아도 됨을 알 수 있었다.

출력에너지는 재생증폭기에서의 gain narrowing 현상, 비선형현상 및 증폭매질의 포화 fluence 등에 의해 제

한된다. 재생증폭기를 k 회 왕복 증폭한 후의 출력 fluence J_k 는^[17]

$$J_k = (1-R)^2 J_s \ln\{G_0^2 [\exp(J_{k-1}/J_s) - 1] + 1\} \quad (9)$$

로 계산된다.

그림 6은 증폭매질이 Nd:YAG, 인산염 레이저글라스 및 Ti:Sapphire일 경우 왕복회수에 따른 출력에너지를 계산한 결과이다. 재생증폭기를 30회 왕복했을 때, 인산염 레이저글라스는 4.6 mJ, Ti:Sapphire는 4.8 mJ, Nd:YAG는 3.3 mJ이었으며, ●은 인산염글라스일 경우의 측정값으로 5 mJ이다. Ti:Sapphire는 다른 매질에 비하여 gain narrowing 현상이 적게 일어나 회절격자쌍을 이용한 펄스압축에 의해 초단펄스를 얻고자 할 때 유용하며, 첨두출력이 낮아 다른 매질보다 많이 왕복할 수 있어 높은 에너지 추출효율에 큰 에너지를 얻을 수 있다. 왕복회수 27회까지는 각 매질로부터의 출력에너지는 거의 같으나 포화 fluence 값과 첨두출력에 의해 매질에서 얻을 수 있는 에너지가 제한된다. 그러므로 증폭매질로부터 많은 에너지를 얻기 위해서는 증폭기에서 낮은 첨두출력을 유지해가며 증폭매질의 포화 fluence 정도까지 증폭시켜야 한다.

III. 결 론

CPA법을 이용하는 초단펄스, 고출력 고체레이저 시스템에서 핵심부에 속하는 재생증폭기의 gain narrowing 현상, 비선형현상 및 에너지 포화상태 등의 증폭특성을 해석하고 최적설계를 위하여 시뮬레이션 코드를 개발하였다.

증폭특성 해석을 위해 3.7 nm, 350 ps로 chirp된 1 nJ의 레이저펄스를 pass당 광학소자 총손실 24%, 이득 1.7인 HAP4 인산염 레이저글라스를 증폭매질로 하는 재생증폭기에 입사시켜 30회 왕복하여 1.49 nm, 140 ps의 4.6 mJ로 증폭된 펄스를 얻었다.

입력펄스의 중심파장, 입력 스펙트럼형태, 증폭매질의 이득대역폭을 변화시켜 분석한 결과, gain narrowing 현상은 증폭매질의 이득대역폭에 가장 큰 영향을 받으며, 입력펄스 형태는 비대칭 정도가 클 때 영향을 받았다.

동일조건상에서 Nd:YAG와 Ti:Sapphire를 증폭매질로 하는 재생증폭기에서 30회 왕복하여 각각 0.07 nm, 49 ps, 3.3 mJ 및 3.09 nm, 270 ps, 4.8 mJ로 증폭된 펄스를 얻었다.

이상의 결과에서 재생증폭기에서의 gain narrowing 현상을 줄이고, CPA법에서 질 좋은 초단펄스를 얻기 위해서는 입사되는 펄스의 중심파장과 증폭매질의 중심파장이 일치하고 대칭인 펄스를 이득대역폭이 넓은 증폭매질에서 증폭시켜야 한다는 것을 알았다. 재생증폭기의 특성을 최대한 활용할 수 있는 증폭매질로는 이득대역폭이 넓고, 비선형굴절율이 작으며, 고에너지를 얻을 수 있는 Ti:Sapphire가 최적매질로 평가되었고, 재생증폭기 설계시 중요한 파라미터에 대하여 해석하였으며 최적설계를 할 수 있는 기틀을 마련하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. A. Meyers, *Encyclopedia of Lasers and Optical Technology* (Academic Press, Inc., San Diego, 1991).
- [2] 戶川拓哉, 大阪大學 大學院 工學研究科 電氣工學 專攻 修士論文 (1992).
- [3] A. Sullivan, H. Hamster, H. C. Kapteyn, S. Gordon, W. White, H. Nathel, R. J. Blair, and R. W. Falcone, *Opt. Lett.* **16**, 1406(1991).
- [4] E. W. Roschger and J. E. Balmer, *Appl. Opt.*, **24**, 3110(1985).
- [5] Y. -H. Chuang, L. Zheng, and D. D. Meyerhofer, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-29**, 61(1993).
- [6] M. D. Perry, F. G. Patterson, and J. Weston, *Opt. Lett.*, **15**, 381(1990).
- [7] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science, Mill Valley, Calif., 1986).
- [8] W. F. Hagen, *Laser Program Annual Report*, 1976, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-50021-77.
- [9] J. E. Murray and W. H. Lowdermilk, *J. Appl. Phys.*, **51**, 3548(1980).
- [10] L. Yan, J. D. Ling, P. -T. Ho, C. H. Lee, and G. L. Burdge, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24**, 418(1988).
- [11] P. Bado and M. Bouvier, and J. S. Coe., *Opt. Lett.*, **12**, 319(1987).
- [12] J. E. Murray and D. J. Kuizenga, *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 27(1980).
- [13] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, **56**, 219(1985).
- [14] M. Ferray, L. A. Lompre, O. Gobert, A. L'Huillier, G. Mainfray, C. Manus, A. Sanchez and A. S. Gomes, *Opt. Commun.*, **75**, 278(1990).
- [15] J. S. Coe, P. Maine, and P. Bado, *J. Opt. Soc. Am.*, **35**, 2560(1988).
- [16] M. Pessot, J. Squier, P. Bado, G. Mourou, and D. J. Harter, *IEEE J. Quntum Electron.*, **QE-25**, 61(1989).
- [17] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, *J. Appl. Phys.*, **51**, 2346(1980).
- [18] R. N. Thurston, J. P. Heritage, A. M. Weiner, and W. J. Tomlinson, *IEEE J. Quntum Electron.*, **QE-22**, 5(1986).
- [19] Y. -H. Chuang, D. D. Meyerhofer, S. Augst, H. Chen, T. Peatross, and S. Uchida, *J. Opt. Soc. Am.*, **B8**, 1226(1991).
- [20] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Foundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, New York, 1991).

**A Numerical Analysis of the Amplification Properties of
the Regenerative Amplifier**

Nam-Hi Kim and Byung-Tai Kim
*Department of Optical Engineering, Chongju University,
Chongju 360-764, Korea*

(Received: January 17, 1993)

The simulation code was developed to analyze the amplification properties of the regenerative amplifier, such as gain narrowing, nonlinear effect, and energy saturation. To reduce gain narrowing in the regenerative amplifier, the input pulse with a symmetrical shape and the same center wavelength of the active medium should be amplified in the active medium with a broad fluorescence linewidth. In this respect, Ti:Sapphire with a low nonlinear refractive index, a high saturation fluence, and a broad fluorescence linewidth is the most appropriate medium for the regenerative amplifier. The knowledge and the important parameters were acquired for the optimum design of the regenerative amplifier.