

1TW Nd:Glass 레이저 시스템 개발 (Development of 1TW Nd:Glass laser system)

이 상수, 공 홍진*, 김 선호, 이 민희, 홍 경희, 이 인원, 김 운명
KAIST, 인하대, 육사, 표준연구소, 단국대

ABSTRACT

1 tera watt (10^{12} watt)의 출력을 내는 phosphate glass 레이저를 개발하는 것이 최종목적이며, 1차적으로 완전한 계통도를 설계하였다.

1. 서론

레이저의 활성 물질로 사용하는 Nd:glass는 물리적, 광학적 특성을 고려하여 phosphate-glass가 고출력 (1TW) 레이저로 적합하다고 판단하여 선택하였으며, 기본 레이저 발진기로는 Q-switched mode locked Nd:YLF 레이저를 선택하였다. 이 YLF 레이저의 단일 레이저 펄스의 에너지는 100 μ J 이상이며, 펄스 폭은 100psec로 출력은 1mega watt 정도이다.

이 레이저 펄스를 1TW로 증폭하기 위하여는 증폭기 전체를 통하여 1백만배로 증폭하여야 한다. 따라서 주증폭계는 6단으로 구성하였으며, 제 1, 2, 3, 4 단은 rod amplifier로 구성하였고, 제 5, 6 단은 disk amplifier로 설계, 제작하였다. 한편, 레이저 증폭기의 각 단마다 레이저 빔의 크기가 달라져야 하므로 광속확대기가 필요하며, 그를 통한 빔을 여과하기 위하여 공간주파수여과기를 포함하여 설계하였다. 또한, 빔의 이득을 낮추는 바람직하지 않은 효과를 보완하기 위하여 optical

isolator를 도입하였다. 이를 위해 Faraday rotator, Pockels cell 그리고 passive rotator를 각각 선택하여 2개, 2개, 1개씩을 사용하였다. 이상과 같은 1TW Nd:glass 레이저 계통을 설계하였다.

2. 본론

(1) Nd:glass 레이저계의 증폭기 설계

가. 레이저 glass의 특성

그림 1에 silicate glass와 phosphate glass에 대한 형광 분포가 나타나 있다. 형광 선폭은 silicate glass는 110cm^{-1} 이고 phosphate glass는 이보다 좁은 80cm^{-1} 이다.

또한 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 천이에 대하여 최대 형광 파장은 silicate glass의 경우 $1.06\mu\text{m}$ 부근이고, phosphate glass에서는 $1.05\mu\text{m}$ 이다. 고출력 레이저 증폭기에 사용되는 레이저 glass는 host material의 종류에 따라 silicate glass와 phosphate glass, fluorophosphate glass 등이 있고, 이들 제품을 생산하는 회사로는 Schott

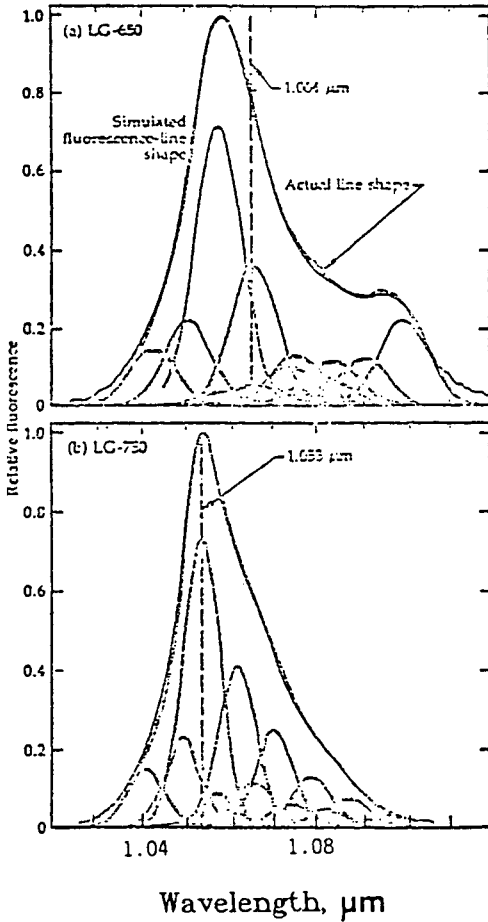


그림 1. Fluorescence line shapes of (a) silicate and (b) phosphate glass

사와 Hoya(일본) 사등이 있다. 이들 제품들은 회사에 따라 조금씩 특성의 차이가 있으며, 그 결과를 종합한 결과 phosphate glass가 silicate glass보다 흡수율이 좋고 광학적 특성이 우수하다. 따라서 본 연구에서는 레이저 증폭기에 phosphate glass를 사용하기로 하고 Schott사의 LG760 glass를 선정하였다.

아래에 LG760의 특성을 나타내었다.

concentration, %wt. Nd^{2+}	3.0
No. of Nd^{3+} ions $(10^{21}) / cm^3$	2.180

Lasing properties

Lifetime of fluorescence, μs	350
-----------------------------------	-----

Maximum fluorescence, nm	1053
Fluorescence half-width, nm	19.6
Induced emission cross-section $[10^{-20} cm^2]$	4.2
Gain factor $[cm^3 / Jcm]$	0.223
Damage threshold $[J/cm^2]$, 40ns	25
Optical properties	
Refractive index(587.6nm)	1.514
Refractive index(laser)	1.508
$dn/dT [10^{-6}/^{\circ}C]$	-6.8
Thermal coeff. of OPL $[10^{-6}/^{\circ}C]$	0.4
Physical properties	
Density $[g/cm^3]$	2.60
Thermal expansion coeff $[10^{-6}/^{\circ}C]$	12.5
Thermal conductivity $[W/mK]$	0.67

나. 레이저 증폭기에서의 축적에너지 분배

본 연구에서 레이저 증폭기를 통하여 얻고자 하는 펄스폭은 100ps 이고, 출력에너지는 100J 이다. 하지만 Q-switched, mode-locked Nd:glass 레이저로서, 상용으로 나오는 레이저 발전기의 펄스폭은 100ps 이고, 단일 펄스의 에너지는 수 μJ 정도이므로, 본 연구의 증폭기에 주입시킬 레이저 발전기의 특성은 상용되는 레이저 발전기의 출력값을 갖는다고 가정하였다. 레이저 증폭기에서 각 레이저 유리에 축적시켜야 할 에너지 양은 레이저 유리를 통과하는 단위 면적당 에너지, 펄핑효율, 추출효율등을 고려하여야 하며, 레이저 유리의 단면을 통과하는 단위 면적당 에너지, 즉 energy fluence는 레이저 유리 양면에 입혀져 있는 반반사막, 광속 확대기등 광학 부품을 손상시키지 않는 threshold damage fluence보다 작아야 한다. 따라서 위의 모든 사항을 고려하여 본 연구의 전체 계통도는 표 1과 그림 2와 같다.

다. 레이저 증폭기 펄핑용 flashlamp의 특성

레이저 증폭기의 펄핑광원으로 Xe 삼광

	RA-1	RA-2	RA-3	DA-1	DA-2
# of disks/rods	3	3	3	18	12
L(cm, active medium)	75	75	75	43.2	28.8
length amp. box				360	456
D(cm, clear aperture)	1.0	2.0	4.0	8.0	20.0
A(cm ² , clear aperture)	0.785	3.14	12.6	50.3	314
V(cm ³ , active medium)	58.8	235.6	943	2160	9050
Input energy x gain	10mJ x 40	0.4J x 10	4.0J x 2.5	10J x 2.5	25J x 4
Output energy fluence(J/cm ²)	0.51	1.3	0.8	0.5	0.32
E _{st} (to be extracted)	0.4J	3.6J	6.0J	15J	75J
E ₀ (in capacitor)	2.0kJ	18kJ	30kJ	75kJ	375kJ
# of flashlamps	6	6	12	12	24
E ₀ /flashlamp(kJ)	0.34	3.0	2.50	6.25	15.6
Length of flashlamp(cm)	25	25	25	120	152
Diameter of flashlamp(mm)	5.0	24.4	20.3	10.6	20.9
Capacitance(μF)	56.7	862	636	44.7	110
Voltage(kV)	3.4	2.64	2.80	16.7	13.3
I _p (kA)	0.8	11.4	8.92	3.74	9.25
J _p (kA/cm ²)	4.1	2.43	2.75	4.25	2.70

표 1. Results of amplifier design

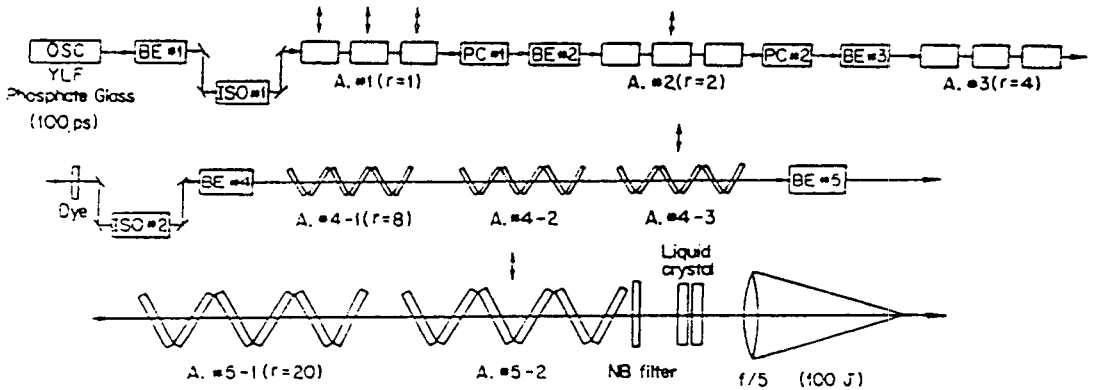


그림 2. High power Nd:glass amplifier system

램프가 사용된다. 이때 섬광램프를 작동시키는 회로는 그림 3과 같다. 주 제어장치에서 충전 명령이 내려지면 relay 1이 ON 상태가 되고, relay 2는 OFF 상태가 되어 에너지가 축적된다. 에너지가 축적되면 relay 1 과 relay

2가 OFF 상태가 되며, 주 제어장치에서 trigger 명령이 들어오면 flashlamp에서 방전이 일어나고, 방전이 끝나면 relay 1은 OFF 상태에 있고, relay 2가 ON 상태가 되어 축전기에 남아있는 여분의 에너지를 R₂를 통하여 방전시켜 고전압

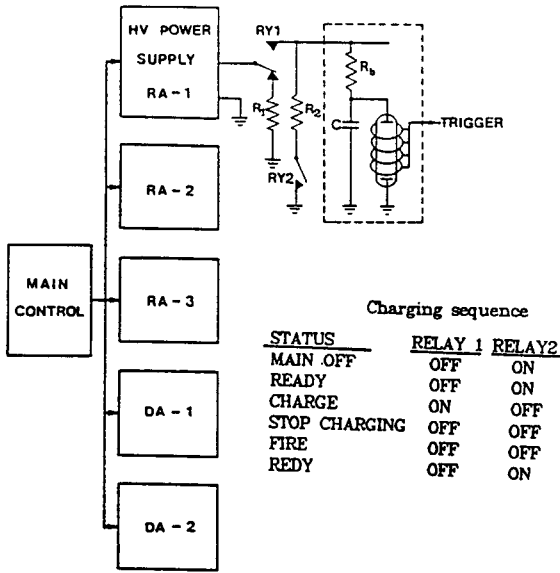


그림 3. Flashlamp driving circuit

회로가 안전한 상태로 유지된다. 레이저 증폭기에서 flashlamp의 특성이 매우 중요하다

flashlamp에서 나오는 빛의 분광분포나 펄스폭에 따라서 레이저 증폭기의 효율이 변하기 때문에 flashlamp의 특성을 정확히 알아야 한다. flashlamp에 인가되는 전기적 에너지가 증가하면 방출 spectrum이 단파장 쪽으로 이동하면서 단파장에서의 emissivity가 증가한다.

따라서 flashlamp의 복사방출효율과 Nd:glass의 펌핑효율은 램프의 직경, Xe의 압력, 인가하는 에너지에 따라 크게 달라진다.

라. Rod amplifier의 설계

Flashlamp에 흐르는 전류밀도에 따라서 방출되는 빛에너지의 분광분포는 그림 4와 같이 전류밀도가 증가하면 자외선 영역의 방출이 상대적으로 증가하고, 800 ~ 1000nm 부근에 있는 선 spectrum이 없어지면서 흑체복사에 가까워진다. 따라서 높은 전류밀도에서는 단파

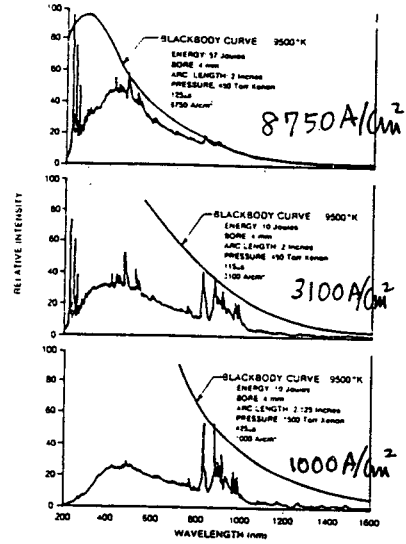


그림 4. Spectra of Xe flashlamps at different current density

장 영역에서의 방출에너지가 상대적으로 증가하므로 펌핑효율을 저하시킨다. 따라서 flashlamp의 설계에서 전류밀도를 5.0 kA/cm² 이하가 되도록 설계하였다. 또한 flashlamp에서 방전이 일어날때 형성된 플라즈마는 부분적으로 투명한 체적 방출체이기 때문에 방출되는 복사에너지는 램프축에 대한 각도에 따른 플라즈마의 깊이에 따라 다르다. 따라서 방출되는 복사에너지의 공간분포는 램프축의 수직선으로 부터 보는 각도 0에 대하여 그림 5와 같은 분포를 갖는다. 이러한 표면 방사체에서 방출되는 빛을 glass rod에 집속시키기 위해서 효과적인 집속반사경은 타원주반사경(elliptictroughreflector)이다. 타원주반사경에서 glass rod와 램프의 위치를 타원의 두 초점으로 하고, 두 초점간의 거리를 flashlamp와 glass rod의 크기를 고려하여 적절한 값으로 정하며, 이때 glass rod의 크기와 램프의 직경에 대하여 집속반사경의 집속효율이 그림 6에 나타나 있다. 이 그림에서와 같

이 레이저 rod가 flashlamp의 bore diameter보다 작을 경우에는 낮은 이심률에서 효율이 좋으며, 레이저 rod가 램프 직경보다 클 경우에는 큰 이심률에서도 효율이 좋다.

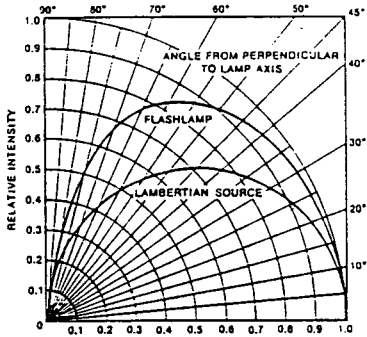


그림 5. Spatial distribution of radiation intensity for flashlamp

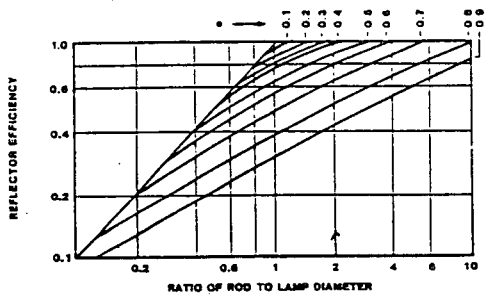


그림 6. Geometrical efficiency of an elliptical reflector

본 연구에서는 rod amplifier의 1단계인 RA-1에 대하여 유리 막대의 직경이 1.0cm이고 flashlamp의 직경이 5mm이므로 그림 6에 의하여 최대 효율을 갖고 이심률이 큰 값을 택하기 위하여 이심률을 0.4를 선택하였다. 또한 한개의 rod에 2개의 램프가 이용되므로 쌍타원주집속 반사경으로 설계되어야 하며, 쌍타원의 공동 초점에 레이저 유리 rod를 두고, 나머지 양 초점에 각기 램프를 두도록 설계하였다. 또한 반사경 재질이 금속이므로 램프에 방전이

일어날때 고압에 대한 절연등을 고려하여 그림 7과 같이 설계하여 제작하였다.

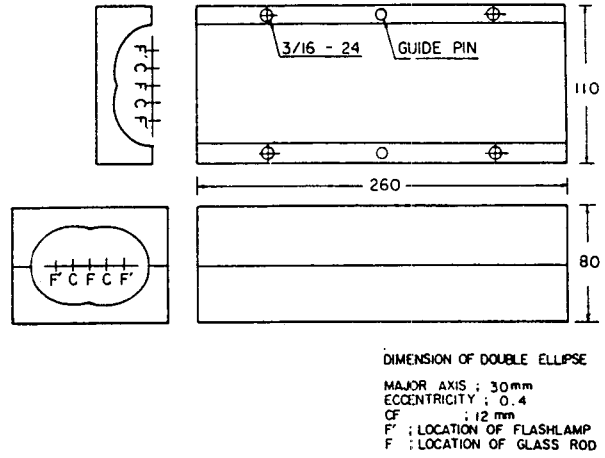


그림 7. Designed double elliptical trough reflector

마. Disk amplifier의 설계

레이저 증폭기에서 입력출력이 증가하면 이득포화현상이 일어나고 유리의 비선형효과에 의하여 self-focusing등이 일어나서 국부적으로 유리에 손상을 입게된다. 또한 펄핑광에서 흡수된 일부의 에너지가 열에너지로 전환되어 유리가 열팽창을 하게 되고 레이저 광속의 파면이 일그러진다. 또한 표면에 있는 반사막등에 손상을 입게 되므로 에너지 fluence를 줄이기 위하여 레이저 광속의 구경을 크게 하여야 하며, glass rod를 이용할 경우 구경이 커지면 흡수된 열의 방출이 느려지며, 제작비용이 상대적으로 많이 든다. 따라서 구경을 크게 하고 냉각을 용이하게 하기 위하여 disk amplifier를 사용하고자 한다. 레이저 발전기에서 나오는 광속이 선펡광이 되어 있을 경우, 평판 유리를 레이저 광속에 대하여 Brewster 각으로 놓으면 표면에 반반사막을 증착시키지 않아도 반사율이 0이 되므로 반반사

막에 증착할 필요가 없다. 그러나 평판의 크기는 광속에 대하여 수직으로 설치할 때 보다 크기가 늘어나지만 대신에 광속이 통과하는 기하학적 광노정이 증가하므로 같은 에너지 이득에 대해서는 같은 체적의 유리평판이 필요하게 된다. 즉, 평판 증폭기에서 광속에 대하여 Brewster 각으로 평판을 놓을 경우 레이저 광속이 통과하는 광로는 그림 8과 같다. 평판 유리를 그림 9의 (a)와 같이 Zig-Zag으로 설치하여야 하기때문에 증폭기의 길이는 360cm가 된다.

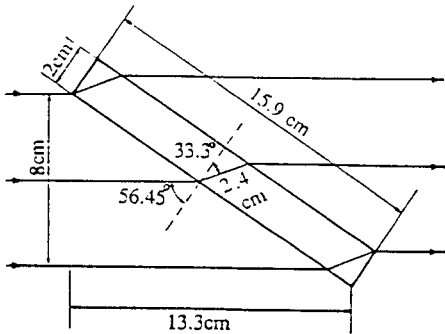


그림 8. Beam propagation through 2.0cm-thick glass disk

증폭기를 box형으로 할 경우에는 증폭기의 단면이 그림 9의 (b)와 같이 포물주반사경(parabolic trough reflector)을 설계하여야 한다. 또한 증폭기 상하면은 램프에서 나온 일부의 광의 손실을 방지하기 위하여 평면 반사경을 사용한다. 본 연구의 레이저 증폭기의 최종 단계인 마지막 평판 증폭기에서는 광속의 구경을 20cm로 확대하기 위하여 평판 유리 하나의 크기는 21cm x 42cm x 2cm 이다.

이 경우 평판은 12장을 사용하고 active length는 28.8cm이고 증폭기 전체의 길이는 456cm이다.

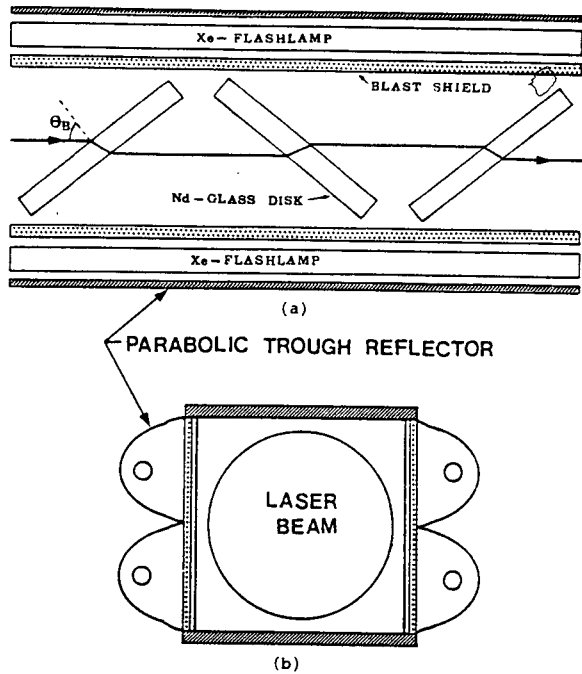


그림 9. Schematic diagram of a disk amplifier

(2) 광속 확대기 계통 설계

고출력을 얻기 위하여 광출력의 증폭기에 입사하는 레이저 광속을 초기 1mm 직경으로부터 마지막 22cm에 이르기까지 광속확대기가 필요하다. 이에 필요한 광속확대기를 광선수차, spot diagram 및 평행도를 나타내는 방향여현으로 평가하며, 최적화 방법으로 설계하였다. 경제성을 고려하여 같은 크기의 광속에 대해서는 같은 렌즈군을 사용하도록 하였다. 이들 렌즈군은 대부분 공기층을 갖는 이중렌즈형이다.

(3) Optical isolator의 설계

Target에서 반사된 빛에 의한 레이저 손상, ASE에 의한 이득 감소 및 잡음광, pulse

selector에서 완전히 제거되지 않은 잡음 펄스의 증폭, 경계면에서의 광축 방향 반사에 의한 self-oscillation, flash lamp 광이 target으로 들어가는 것등의 방지등 으로 사용하는 optical isolator를 본 연구에서는 2개의 Faraday rotator와 2개의 Pockels cell을 채용하고, 선택사양으로 1개의 dye cell과 1개의 액정소자를 사용하기로 하였다. (그림 2)

첫번째의 Faraday rotator FR 1은 첫번째 증폭기 앞에 두며, 2개의 편광자와 45 회전판으로 구성하여 후방 반사로 부터 레이저 발진기를 철저히 보호하는 역할을 담당한다. 2개의 편광자이며 45 회전판을 사용하고, Faraday rotator 재료로는 Verdet 상수의 분산이 적은 FR-5를 선정하였다. 2개의 Pockels cell PC 1과 PC 2는 제 1증폭기와 제 2증폭기 사이에 PC 1을 제 2와 제 3증폭기 사이에 PC 2를 설치하여 ASE와 후방반사를 억제하고 잡음신호를 제거한다. 각각 2개의 편광자와 KD*P 결정으로 구성하되 쉽게 구할 수 있는 1" 직경의 결정을 사용한다. 제 3증폭기와 disk 증폭기를 단절시키기 위해 제 3증폭기 후단에 포화흡수 dye cell을 1개 설치하고, 그 다음에 제 2 Faraday rotator FR 2를 두어 목표물에서 반사되어 나오는 빛을 차단 하도록 한다. 제 4증폭기와 제 5증폭기사이에는 optical isolator를 설치하지 않고 그대신 제 5증폭기 다음에 액정을 이용한 반사 optical isolator를 설치한다.

이 액정소자 LC 1은 선편광을 원편광으로 바꾸어주는 1/4 파장판 1개와 cholesteric 액정으로 구성하며 액정용기는 국내 제작하였다.