

TW Nd:Glass 레이저 개발현황및 응용 Nowaday Development of TW Nd:Glass Laser System and Its Application

이상수,공홍진,남창희,김병운(KAIST),홍경희*,이민희**,이인원*,김운명**,김병태*,김선호**
(*:육사, **:인하대, *:표준연구소, **:단국대, *:청주대, **:KIST)

1TW 레이저 개발기술은 모든 TW급 레이저 개발을 위한 첫 단계의 핵심기술 이다. 본 연구에서는 지난 3년간 개발하여온 설계및 제작된 부품들에 대한 재원이 소개되고, 또 2단계 rod증폭계까지의 실험 결과를 측정, 분석하였으며 개발된 TW레이저의 응용분야에 대해 고찰하였다.

1. 서 론 ^{1,2)}

레이저의 종류및 응용분야가 매우 다양하지만, 레이저 개발 연구 분야에서 가장 중요하게 여겨지고 있는 것이 TW 급의 고출력 레이저 개발이다. 레이저 출력이 커지면 서 그 이용이 기하 급수적으로 확대되어 나가며, 그중의 하나가 수소 원자 핵 (D,T)의 핵 융합 연구이다. TW급레이저를 개발하는 기술을 보유하고 있으면, 이 이상의 고출력(101-102 TW)을 가진 레이저의 설계및제작기술은 이미 보유하게 된셈이다. 왜냐하면, 예로서100 TW의 레이저는 2-3 TW의 레이저를 수십개,혹은수백개를 병렬로 설치하는 방법이 사용되기 때문이다. 1 TW에서 2-3 TW로의 전환은 원판증폭기인 disc amplifier 1단을 추가함으로써 얻어지게 되며 이 추가되는 레이저 증폭기는 앞서 보유하고 있던 증폭기의 설계기술로 쉽게 개발이 가능하기 때문에, 기술적으로 1 TW 레이저 개발기술이 바로 수십 TW급의 레이저 개발기술의 초석이 된다. 세계적으로 핵융합 전기발전엔 연구의 최종목표를 두고 있으며 gain이 20 배 이상을 얻기 위하여 1.5-2 MJ (3-5 nsec)의 레이저 에너지를 가진 700 TW급 이상의 레이저 개발에 역점을 두고 있다. 그러한 고출력 레이저는 3 TW급의 레이저를 288개 line을 병렬로 설치한 것이다(Lawrence Livermore National Lab. NOVA Upgrade 1991). 이와같이 TW급 레이저의 기본기술은 바로 rod 증폭기와 disc 증폭기의 설계와 제작기술이라고 할

수 있으며, 본 1 TW 레이저 개발 기술이 모든 TW급 레이저의 개발을 위한 첫 단계의 핵심기술이 된다. 따라서, 본 연구는 매우 의미 있는 개발 연구라고 볼 수 있다. 지난 3년간 본 연구에서 축적하여온 것은 5단계의 rod 증폭계열 및 2단계의 disc 증폭계열의 설계를 하여 왔으며, 특히 2단계 rod 증폭단계까지 제작완료하였고, 5 단계 rod 증폭단계까지는 reflector와 deflection mirror mount를 제외하고는 이미 모든 준비가 완료되어 있다. 본 연구에서는 지난3년간 개발하여온 설계및 제작된 부품들에 대한 재원이 소개 되고, 또 2단계 rod 증폭계까지의 실험 결과를 측정, 분석 하였으며 개발된 TW레이저의 응용분야에 대해 언급하고자 한다.

2. 레이저 발전기와 단일 펄스 선택장치.³⁾

1) Nd:YLF결정의 레이저 이득매질로서의 특성.

본 실험에 사용된 레이저 발전기의 이득매질은 Nd:YLF결정으로서 Nd:YAG결정보다 선폭(13.5A)이 넓기 때문에 짧은펄스를 얻을 수 있으며, 파장이 1.053 μ m로서 Nd:glass로 증폭시킬때 파장이 일치하여 Nd:YAG보다 유리하다.

Nd:YLF결정은 단축 결정(uniaxial crystal)이므로 자연 선편광되어 있으며, 열적 렌즈(thermal lensing)효과가 Nd:YAG에 비해 적기 때문에, 안정출력영역(dynamic range)이 넓고 단일 횡모드(TEM₀₀) 출력이 높다. 그리고 복굴절성이 크기때문에, 열적 복굴절성의 영향을 적게 받아 열적 무극화(thermal depolarization)가 작으며 regenerative amplifier에 매우 유리하다. 열전도도는 Nd:YAG보다는 작지만 Nd:glass보다는 훨씬크며, 연속파(CW) 발진이 가능하며 극소량의 수용성을 가지고 있다. 광학적으로 Nd:YAG만은 못하기 때문에, 발진기외에 고출력 증폭기용 매질로서는 부적합 하지만 형광수명이 480 μ s로서 Nd:YAG의 244 μ s보다 길기 때문에 문턱 발진 펌핑 에너지가 작은 것이 Nd:YLF의 특징이다.

짧은 펄스를 얻기위해 Mode-locking시키고 침투출력을 높이기 위해 Q-switching을 시킨 CW Nd:YLF레이저인, Quantronix사의 4216형 레이저를 발진기로 이용했으며, 그 특성은 다음과 같다.

- ① 파장:1.053 μ m, 100MHz Mode-locking, 공진기 길이:1.5m, 400Hz Q-Switching.
- ② beam diameter:0.33mm, beam divergence:4.1 mrad
- ③ CW평균출력:9.8W, Mode-locked 평균출력:8.3W, Q-switched 평균출력:1.65W
- ④ Q-switched envelope:200ns, Mode-locked 펄스폭; etalon 없이 : 50ps, 0.2mm etalon : 100ps, 2mm etalon : 200ps, 5mm etalon : 500ps (FIG.1참조)

2) CW Mode-locked Q-switched Nd:YLF 레이저의 특성.

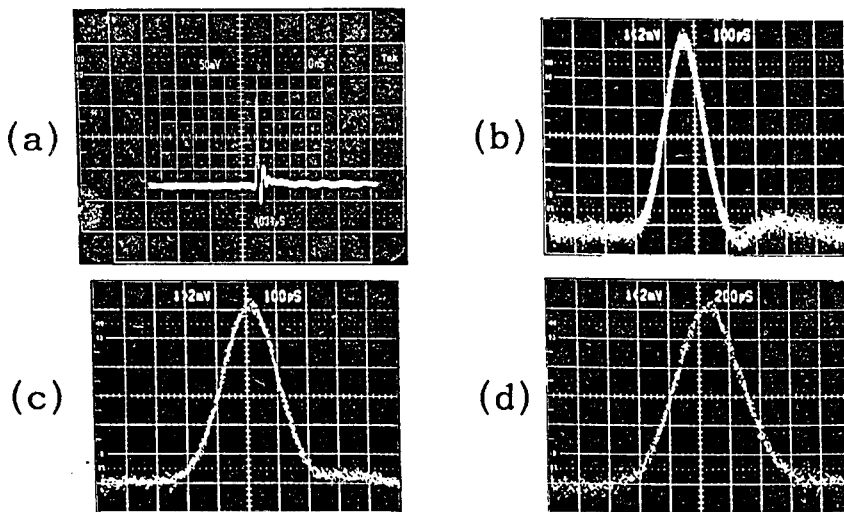


Fig.1 (a) Selected single pulse (0.5ns photodiode-500MHz oscilloscope)
 Q-switched Mode-locked pulse with:
 (detector-sampling oscilloscope response time:100ps)
 (b) 0.2mm etalon (c) 2mm etalon (d) 5mm etalon

3) 단일펄스 선택장치의 특성⁴⁾

단일펄스 선택을 위해 Pockels Cell을 교차된 편광기사에서 동작시킨다. 사용된 장치는 Inrad사의 261-090형 Pockels cell로서 반파장 전압이 4.18 kV(at 1.053 μ m)이며 2중의 KD*P 결정으로 이루어져 있으며 전기장은 결정축에 대해 종격으로 인가 되어진다. 단일펄스 선택장치에 의해 선택된 단일펄스의 최대 에너지는 70 μ J (contrast ratio 1 600:1, peak-peak stability 3%)이다.

3. Nd:Glass 막대 증폭기 개발

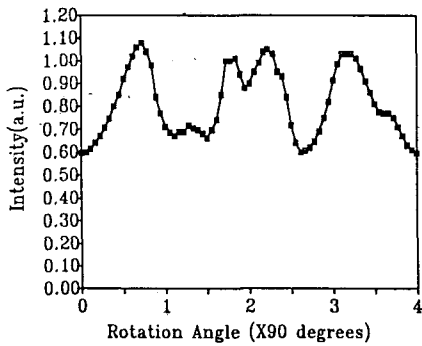
본 연구에서는 1단계 및 2단계 막대 증폭기(RA1,RA2)까지의 제작이 완료되었으며 flashlamp의 방전 특성 및 증폭기의 특성을 조사하였다.

1) 증폭기 제원

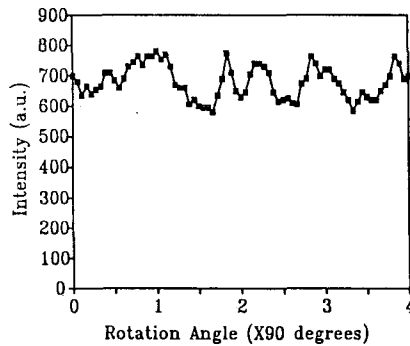
	1단계 증폭기	2단계 증폭기
Rod 모델(Nd+++ wt. %)	LG 750(1.5%)	LG 760(1.0%)
Rod 직경x길이 (mm)	16 x 360	30 x 360
Nd3+ 농도 (1020ions/cm3)	1.49	0.94
Fluorescence lifetime (μ s)	405	411
Reflector 장축(mm)/이심률	61/0.623	60/0.667
Rod jacket 외경x내경 (mm)	45 x 41	60 x 55
Flashlamp jacket 외경x내경 (mm)	35 x 30	35 x 30

2) Reflectors 및 flashlamp 특성

사용된 flashlamp는 ILC Technology회사의 모델 L7058의 변형(수냉식으로 사용기)으로 본 연구에 적합하게 주문 제작한 것으로 자세한 내용은 TW 레이저 개발 최종 보고서 본문에 있다. 본 실험결과 이 flashlamp들의 방전 문턱 전압은 900V이하이며, 문턱 전압근처인 900V 에서 shot-to-shot 안정성은 2.5% 이하로 평가되었다. 이 안정성을 이용하여, 제작된 RA1및 RA2 타원 반사체에서 flashlamp를 방전시켜 가면서 방향에 따른 강도 분포를 측정하였다.(그림 2) 그리고 아래의 사진에 flashlamp의 방전 모양을 두개의 서로 다른 방향에서 포착하였다.



(a)



(b)

Fig.2 Flashlamp rotational intensity distribution in the RA1(a) and RA2(b) stage.

3) Rod 증폭기의 특성

RA1의 이득을 측정하기 위해서 그림 3과 같이 실험 장치를 배치하였다. 이 실험에서 PD1의 위치에서 계속적으로 레이저 발진기에서의 출력을 monitoring하는것은 발진기에서의 출력에 shot-to-shot fluctuation이 있더라도 이의 오차를 보정할 수 있기 위해서이며, PD2는 증폭기로부터 멀리 떨어진($\geq 5m$) 위치에 두어서 flashlamp가 방전할 때 생기는 전기적 또는 광학적잡음으로 측정시 생기는 오차를 줄였다. 이때 레이저 beam이 진행한 거리가 충분히 길기 때문에 생기는 Fresnel ring pattern에의해 레이저 beam의 공간적위치에 따라 이득이 달라지는 것을 방지하기 위해 PD2 앞에는 diffuse경 attenuator로 miler sheet를 여러장 겹친 것을 사용 하였다. 그리고 레이저 발진기로부터 RA1까지의 거리가 멀기 때문에, 레이저 발진기 출력의 divergence를 생각해야 한다. 레이저 발진기의 출력은 diameter가 2mm 이고 divergence는 4mrad 이므로 레이저 beam이 SF1을 통과한후 RA1의 rod 직경보다 커지기 때문에 SF1앞에 hard aperture를 두어 beam을 truncate하였다. 이 hard aperture의 직경은 2.7mm로서 5.2배의 광속확대기 역할을 하는 SF1을 지난후 RA1에 입사될 때는 광속의 직경이 14mm가 된다. 이 hard aperture의 위치는 image relay system의 구도에 따라 설치하였다. 그리고 flashlamp의 방전시작시간과 레이저 발진기 바로 뒤에 놓인 단일펄스 선택장치인 Pockels cell의 동작시간과의 지연(delay)을 다음과 같이 주

어진다. 먼저 레이저 발진기의 mode-locker가 50MHz의 신호를 내고 있는데, 이 신호와 동기화된 400Hz의 신호를 scaler가 만들어 낸다. 이 400Hz의 신호에 맞추어서 Q-switch가 동작하고, 또 이 scaler의 400Hz에 맞추어서 delay timer와 synchronizing unit이 동작한다. Delay timer는 10개의 channel로 구성되어 있는데 이 중 하나의 channel이 RA1을 구동시키며 synch. unit의 출력은 digital delay generator(DDG)를 통해 4개의 출력을 다시 만들어 내는데 이 중 하나가 단일펄스 선택장치를 구동 시킨다. RA1 구동 펄스와 단일펄스 선택장치 구동펄스와의 지연시간에 따른 이득의 변화를 조사한 것이 그림 4에 나타나 있다. 각 점들은 5번 이상 shot하여 그 평균값과 편차를 나타낸 것들이다. 이 때 rod에는 IMF(Index Matching Fluid:물과 에틸렌 글리콜을 50:50으로 혼합한 것) 로써 냉각 하였으며, flashlamp는 냉각수를 흘리지 않고 N2 gas로 불어서 냉각효과와 cleaning효과를 같이 얻으려 하였다. 이때 gain이 최대가 되는점은 delay time이 375 μ sec가 될때 였으며, delay timer을 375 μ sec로 고정시켜 놓고 capacitor charging voltage를 높이면서 gain을 측정한 것이 그림 5의 (b)이다. 그리고 그림 (a)는 같은 실험조건에서 flashlamp에 D.I water로 냉각을 한 경우로서 냉각을 하지않은 경우의 gain과 비교하면 증폭기의 성능이 무척 많이 향상 되었음을 알 수 있다. (a)와 (b)의 solid curve는 각 data point들의 smooth fitted curve이다.

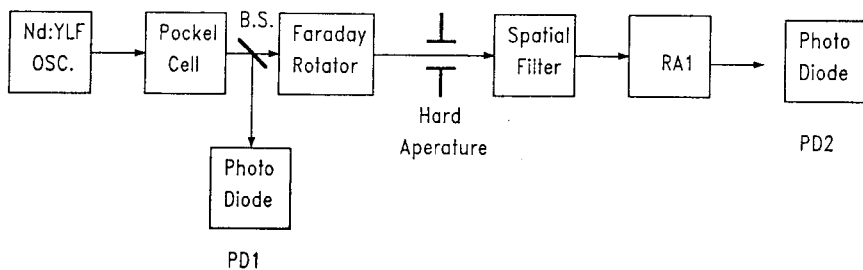


Fig.3 Experimental setup for the measurements of the gain in the RA.

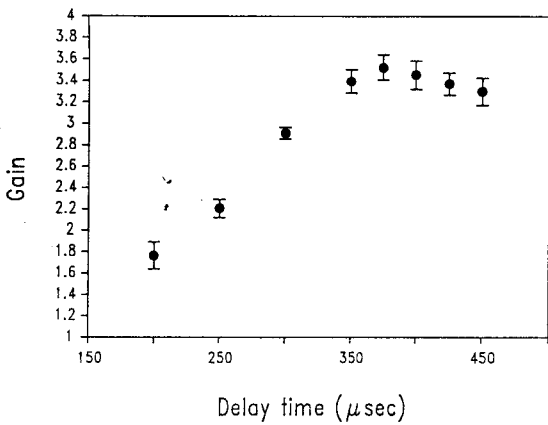


Fig.4 The small signal gain of RA1 for different delay time.

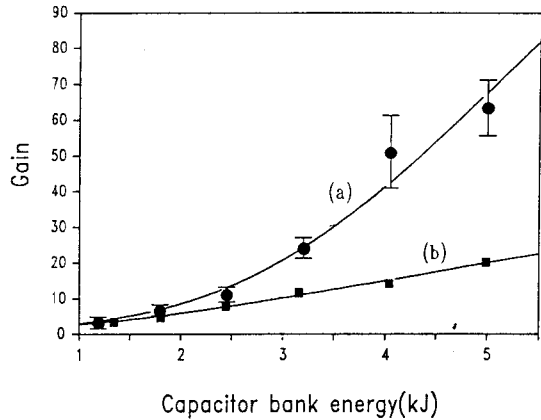


Fig.5 The small signal gain of RA1 when the flashlamps are cooled(a) and not cooled(b).

4. TW 레이저 개발현황및 응용

1). 단계별 목표의 외형적 달성도.

표3. 단계별 추진상황.

1990년도 개발목표

부품	OSCILLATOR	RA1	RA2	RA3	RA4	RA5	DA1	DA2
REFLECTOR	완료	완료	완료	X	X	X	X	X
Nd:GLASS				구매완료	구매완료	구매완료	X	X
capacitor				구매완료	구매완료	구매완료	X	X
flash-lamp				구매완료	구매완료	구매완료	X	X
설계				설계완료	설계완료	설계완료	설계완료	설계완료

2). 연구결과와 질적인 수준.

앞에서 제시된 것과 같이 RA1과 RA2까지의 제작은 완료되었으며, 향후 증폭실험을 통하여 출력의 최적화 조건을 찾아낼 것이며, 특히 nonlinear beam propagation analysis를 위한 computer simulation program을 개발하고, 동시에 RA1과 RA2의 증폭된 광속의 beam profile을 비교하여 RA3-5 와 disc amp.의 설계시 응용할 것이다. 이 때까지 개발된 증폭기의 질적인 수준은 실험결과를 살펴 볼

때에 우수하다고 생각되며 본 연구의 결과가 고체레이저의 개발분야에 기여하는 바는 큰 직경을 가진 고출력 레이저의 개발분야에 선구자적인 역할을 할 수 있다고 확인하는 바이다. 본연구의 결과 TW레이저의 최종단계까지 설계가 완료되어 있는 실정이므로 연구비의 지원만 보장된다면 최종목표의 도달은 확실하다고 볼수 있다.

4. 기술저변확대효과.

본연구를 통하여 11개 대학에 TW레이저관련 기초연구를 수행하여왔으며, 이러한 기초연구가 바로 국내의 저변 기술및 고급인력의 양성에 기여한 바가 크다고 볼 수 있으며, 본 연구가 종료된다면 다음과 같은 기술분야에 파급효과가 있을 것으로 예상된다.

- (1). 고출력 레이저를 이용한 X-RAY발생과 이를 이용한 X-RAY LITHOGRAPHY분야.
- (2). 본연구에서 터득한 고출력 레이저의 설계기술및 제작기술을 바탕으로 소형의 산업용 고출력레이저의 개발과 이를 이용한 소형 X-RAY LITHOGRAPHY 장비의 개발분야.
- (3). X-RAY MICROSCOPY 분야(의학, 생물학에 기여함).
- (4). X-RAY LASER분야.
- (5). 신물질 개발분야.
- (6). 다광자 연구및 비선형 현상 연구분야.
- (7). D-T, D-D 핵융합 기초연구분야.
- (8). 인공위성의 추적등의 우주항공분야(궤도의 추적 정확도가 5cm이내의 정밀도).
- (9). 기타 다양한 고출력 레이저광 응용분야.

5. 결 론

1988년부터 시작된 " TW Nd:Glass 레이저 개발 " 특정연구는 3년간 15억원의 예산,개발계획으로 시작되었다. 그러나, 예산상의 문제로 TW 레이저 개발연구에 지난 3년간 투입된 자금은 7억원이었으며, 이중에서 10개 대학의 기초연구비 지원과 세부과제로서 Excimer 레이저 개발연구 및 광섬유 증폭기 연구등에 연구비 지원으로 실제 TW 레

이저 개발에 투입된 순 연구비는 지난 3년간 4억 7천만원이었기에, 당초 계획의 1 TW의 출력을 내기에는 무리가 있었다고 본다. 하지만, 배정된 제한된 예산범위내에서 최대의 개발 성과를 거두기 위하여 모든 연구원들의 노력에 의하여, Rod Amp. 2단계까지 완성하기에 이르르게 되었음을 다행하게 생각한다.

일단 Amp. 2단계까지는 완성이 되었으나, 지난 3년간 준비해온 것은 Rod Amp. 5까지 Rod의 구입, Capacitor의 구입, Flash Lamp의 구입, Vacuum Spatial Filter의 제작은 완료되어 있으며, 오직 Rod Amp. Reflector와 Deflection Mirror Mount 등의 제작이 남아 있다. 이후 Disc Amp. 1,2의 설계는 이미 완료되었으며, 연구비가 배정되는 대로 곧 제작 할 수 있는 준비가 되어 있다.

본 TW급 레이저 시설은 국가적으로 중요한 시설이 될 것이며, 일본, 중공, 호주에 이어서, 우리나라에서도 고출력 레이저 광속을 이용하는 실험, 예로서 수소원자핵 (D,T)융합 실험, X-선 레이저 개발 등을 가능케 할 것이므로 본사업의 뜻이 매우 중요하다고 믿는다.

Reference

- 1. W.Seka, J.Soures et al, Appl. Opt. 19, 409 (1980)
- 2. J.Bunkenberg, J.Boles et al, IEEE J. Quantum Electron. QE-17, 1620 (1981)
- 3. Quantronix model 416 laser manual
- 4. A.Yariv, Optical Electronics 3rd ed.(CBS College Publishing, New York, 1985), chap.9.