

플라즈마 기반연구를 위한 1 kJ 급 Nd:Glass 레이저 구축

홍성기, 임창환, 위상봉^a
 한국원자력연구소, ^a한국기술교육대학교

Design and development of 1 kJ Nd:Glass laser for the basic research of plasma

S. K. Hong, C. H. Lim, and S. B. Wee^a
 KAERI, ^aKUT

Abstract - 좁은 공간에 고출력 고에너지 레이저를 집속할 때 발생하는 고밀도, 고에너지 플라즈마 연구는 상태방정식, 실험실 천체물리, 전자가속 등 기초 분야 뿐 아니라 X-선 및 극자외선 광원 개발, 원전 유지보수 등 다양한 산업 활용 분야를 갖고 있어 최근 미국, 프랑스, 일본, 중국 등 선진 강대국에서 크게 주목 받고 있는 연구 분야이다. 한국원자력연구소는 물리나 광학의 원천기술 뿐 아니라 미래 산업에 파급효과 큰 플라즈마 기반 연구를 위하여 1 kJ급 고에너지 Nd:Glass 레이저 시설을 구축하고 있다.

nm정도로 1053 nm 뿐 아니라, 1064 nm 파장에서도 증폭이 가능하다. Nd:Glass 광여기에는 섬광등을 사용되었고, 섬광등 방전을 위한 회로도는 그림 2와 같다. 섬광등의 방전 길이 30 cm, core 직경이 12 mm의 fused silica 재질이 사용되었으며, 내부에는 Xe 가스가 봉입되어졌다. 충-방전을 위한 capacitor bank 용량은 100~350 uF로 설치되었다.

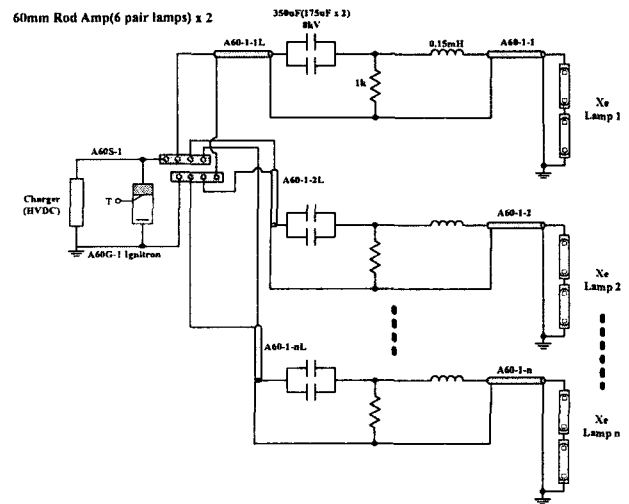
1. 서 론

최근 10년 동안 기술 선진국에서는 고밀도 플라즈마 또는 핵융합 기반 연구를 위해 ~kJ에서 ~MJ급 이상의 초고에너지 레이저 시설들이 활발하게 구축되고 있다.^[1] 그러나 국내에서는 아직 100 J급 이상의 레이저 시설에 대한 운영 경험이 부족한 상태이다. 현재 한국원자력연구소에서는 1 kJ급 (250J-4Line) 고에너지 레이저 시설을 구축하기 위해 일본의 레이저에너지학연구소로부터 Nd:Glass 시설의 일부 증폭기 및 고전압 시스템을 기증받아 재구성 및 광학 설계 검토가 마무리 단계에 있다. 본 발표에서는 KLF(Kaeri Laser Facility) 구축의 전반적인 상황과 앞으로 응용 가능한 연구에 대하여 기술한다.

2. KLF 구축 Layout

2.1 KLF 건물 구축

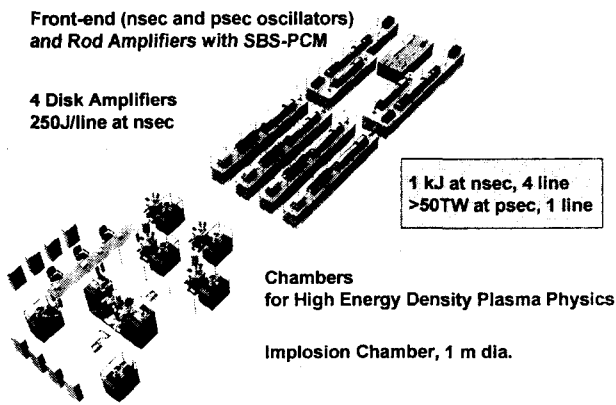
2005년 6월부터 시작된 KLF 개보수 빌딩 공사는 건물 바닥 면적이 약 480 m²이며, 건물 내 대기 청정도는 class 10,000 (10,000개/CFM 이하), 실내온도 25°C±2, 실내상대습도 45%±5로 하여 설계되었다. 특히 면지에 민감한 광학적 장치들과 레이저 공진기 부품들의 세정을 위해 건물 1층에 약 30m² 면적의 class 100 (100개/CFM 이하)의 공기청정실이 구축되었다. 또한 본 건물의 바닥은 두께 50 cm 이상의 철근-콘크리트로, 건물 외부의 진동이나 충격에 따른 건물의 요동을 방지할 수 있도록 바닥을 건물과 분리하였다. 제어실과 Capacitor Banks는 각각 1층과 2층에 나누어져 배치되어졌으며, 이와 같은 건물 개보수 공사는 현재 완료된 상태이다. 건물 개보수 공사와 병행하여 레이저 장치 설치와 업그레이드가 진행되어졌다. 고에너지 레이저 광학설계는 한국원자력연구소와 일본 오사카대학의 ILE(Institute Laser Engineering)와 공동으로 설계 되었으며, 그림 1은 implosion 챔버와 4-beam KLF 시설의 구성도를 보여주고 있다.



〈그림 2〉 60 mm Amp 섬광등 방전을 위한 회로도

2.2 제어 계속 시스템

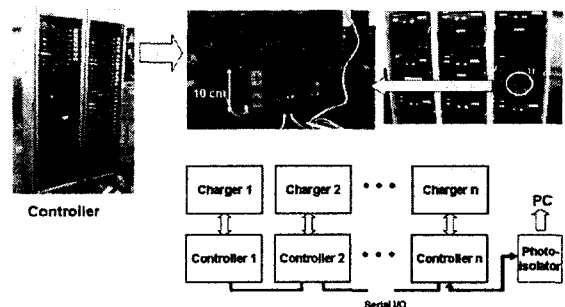
KLF를 운영하기 위한 ICCS (Integrated Computer Control System) 기술을 확보하기 위해 고전압 전원제어장치와 트리거 발생장치를 원격제어 할 수 있는 KLF 제어 시스템을 구축하고 있다. 기존의 아날로그 제어방식의 고전압 전원 제어장치와 트리거 발생장치는 사용자의 조작 간편화, 소형화를 위하여 마이크로프로세서를 이용하여 새롭게 제작되었다. 고전압 전원 제어장치와 트리거 발생장치는 RS-232C 시리얼 포트, 시그널 임-출력(SIO) 포트, 마이크로프로세서로 구성되어 있다. 고전압 전원제어장치에 사용된 프로세서는 PIC-16F8874A이고, 트리거 발생장치의 프로세서는 PIC-16F8873A이다. 각 프로세서는 RS232C의 protocol에 의해 구동되어진다. 고전압 전원제어장치와 트리거 발생장치는 dip 스위치를 이용한 주소설정 에 의해 직렬로 각각 최대 32개까지 연결할 수 있다. 고전압 전원제어장치는 펄핑 에너지를 capacitor banks에 저장할 수 있는 충전용 전원을 제어하며, 트리거 발생장치는 저장된 펄핑 에너지를 방전하는 ignitron 스위치를 구동하기 위한 펄스 발생장치이다. 이러한 업그레이드가 된 고전압 전원 제어장치를 그림 3에 나타나있다.



〈그림 1〉 implosion 챔버와 4-beam KLF 시설의 구성도

2.2 고에너지 레이저 증폭 시스템

고에너지 레이저 출력을 위해서는 증폭시스템이 불가결하다. 그러나 이러한 고에너지 증폭시스템은 금전적, 기술적, 유지보수의 어려움이 따른다. 그러한 어려움을 최소화하기 위해 우리는 레이저 증폭시물레이션을 통하여 최적화 설계를 도입하였다.^[2,3] 증폭기 glass 재질은 Hoya사의 phosphate 계열의 LHG-8과 LHG-80으로 형광 중심파장이 1054 nm, 스펙트럼 폭은 20



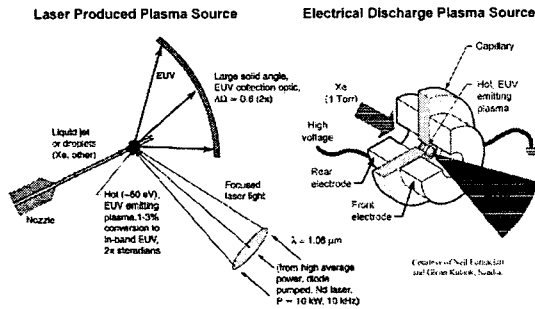
〈그림 3〉 고전압 전원제어장치의 구성도

3. 응용 연구 분야

고에너지 레이저 시설이 제공하는 극한의 물리적 조건은 기존의 시설로는 지금까지 불가능한 에너지 밀도, 물질의 온도 및 압력을 가능하게 한다. 이로 인해 미지의 자연에 대한 새로운 사실을 탐구하는 것이 가능할 뿐만 아니라 이를 이용한 새로운 개념 및 성능의 장치를 개발하는 것도 활발히 진행되고 있다. 고에너지 밀도 물리 연구 분야는 양자공학 분야의 근간이 되는 것으로 에너지 밀도가 매우 높은 상태에 놓인 물질의 특성을 연구한다. 이 분야는 최근 몇 년 사이에 NT, IT, BT 등이 일으키고 있는 기술적 붐을 기대하며 선진국을 중심으로 기초적인 연구가 활발히 이루어지고 있다. 여기서 몇 가지 고에너지 레이저를 이용한 응용 연구 분야를 소개한다.

3.1 레이저플라즈마 방식의 EUV 광원

레이저 플라즈마 EUV 광원의 타겟 재료로서 리튬(Li, 고체), 주석(Sn, 액체, 고체), 산화주석(SnO₂, 저밀도 foam-미립자), 제논(Xe, 액체, 기체) 등이 있다. 리튬이나 주석은 13 nm 근방에서 발광효율이 높으나 화학반응성이 높아 취급이 까다롭고, 데브리 발생이 많다는 단점이 있다. 데브리 발생이 적고 취급이 쉬운 제논이 있으나 제논은 발광효율이 적고 제논 공급기술(기체 확산, 액체 제트의 불안정성, 노즐 수명 등)을 고도로 개발할 필요가 있다. 펄스폭이 수 ns, 레이저조사 출력밀도가 10¹¹ W/cm² 정도의 영역에서 레이저광을 고체(액체, 기체) 타겟에 조사하면 역제동복사 과정에 의하여 레이저에너지가 타겟에 흡수되어 타겟표면이 용융되며 진공 중으로 팽창하는 플라즈마가 생성된다. 레이저광의 주파수와 생성된 플라즈마 내부의 전자플라즈마 주파수가 일치하는 임계밀도 점에서 레이저의 흡수는 멈춘다. 레이저플라즈마는 레이저 용융(ablation)에 의한 고온-저밀도 영역(코로나 영역, 레이저 진행 반대방향)과 저온-고밀도 영역(레이저 진행방향)의 두 부분으로 나뉜다.



<그림 4> 레이저플라즈마와 방전플라즈마의 EUV 생성 원리

EUV 광원이 되는 플라즈마의 전자온도는 약 30eV 정도이며 이온화 상태 전하수는 10정도이다. 제논의 경우 Xe¹⁰⁺4d-5p 전이, 주석의 경우 Sn¹⁸⁻¹²⁺ 4d-4f, 4p-4d 전이, 리튬의 경우 Li²⁺의 라이만 알파선에 의해 13.5 nm의 극자외선 방출이 이루어진다. 각 타겟은 펄스폭, 레이저파장에 대하여 서로 다른 EUV 방출 특성을 보이므로 최적의 EUV 광원개발을 위해서는 각 플라즈마의 밀도 및 온도에 따른 EUV 방출특성을 이해하여야 한다. 즉, 고에너지 레이저플라즈마의 생성, 레이저와 플라즈마의 상호작용을 기술하는 복사유체역학, 광선추적, 플라즈마 내의 원자과정 (방출계수, 흡수계수), 플라즈마의 상태방정식 등에 대한 이해가 선행되어야 한다. 그림 4는 레이저플라즈마와 방전플라즈마의 EUV 생성 원리를 보여준다.

3.2 레이저 피닝

레이저 피닝은 고에너지 펄스 레이저에 의해 발생된 충격파를 이용하여 물체의 성질을 변화시키는 기술의 일종이다. 레이저 피닝의 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 금속 시편에 펄스 폭이 수 ns 정도의 고에너지 펄스 레이저빔을 조사하면 고압의 금속 플라즈마가 형성된다. 펄스 레이저에 의해 발생한 플라즈마는 공기 및 수중에서 고속으로 팽창하기 때문에 양면에서 충격파가 발생한다. 이 때 발생하는 충격파면의 단위 면적당 질량 및 운동량 보존을 하기 위한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\rho_1 D = \rho_2 (D - u_2)$$

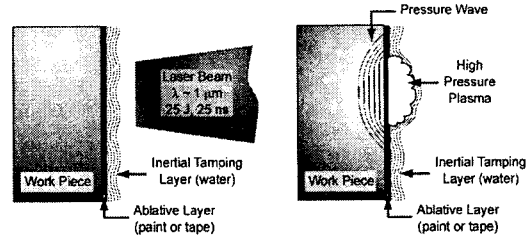
$$p_1 + \rho_1 D^2 = p_2 + \rho_2 (D - u_2)^2$$

때 D는 실험실에서 관측한 충격파의 전파 속도, 첨자는 충격파면의 좌, 우를 나타내며, ρ_1 은 공기 또는 물의 밀도, ρ_2 는 플라즈마의 밀도, u_2 는 플라즈마의 팽창 속도, p_1 은 공기 또는 물의 압력, p_2 는 플라즈마의 압력이다. $\Delta p = p_1 - p_2$ 로 정의하면 위식으로부터

$$\Delta p = \rho_1 u_2 D$$

를 얻을 수 있다. 이 식에서 충격파의 속도를 알 수 있으면, 플라즈마의 팽창속도를 이용하여 플라즈마의 압력을 계산할 수 있다. 파의 속도는 입자속도와 음속의 합으로 나타나지만, 공기 중의 충격파 속도는 음파보다 크기 때문에 플라즈마 팽창 속도로 근사할 수 있다. 또한 수중에서의 플라즈마 팽창은 음속과 거의 같지만, 물은 압축이 없지, 수중에서 음파를 넘는 충격파 발생이 어렵기 때문에 수중에서의 충격파 속도도 플라즈마 팽창속도로 근사할 수 있다. 이상의 가정을 이용하면 플라즈마 팽창 속도로부터 플라

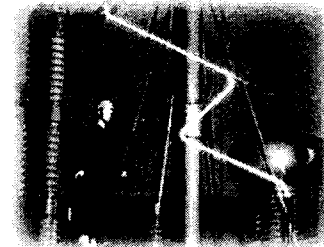
즈마 압력을 구할 수 있다. 레이저 peening은 이렇게 발생된 수 GPa 정도의 고압의 레이저 여기 플라즈마와 금속 재료 표면과의 기계적 상호작용을 이용한 표면처리 기술로 SCC(Stress Corrosion Cracking) 등에 의한 결함 및 잔류응력을 개선할 수 있는 기술이다. 현재 항공기 터빈 엔진의 일부 부품에 적용 중에 있으며, 자동차의 사프트 및 기어 부품 등에도 적용이 가능할 뿐만 아니라, 원전보수에도 적용될 가능성이 크다. 그림 5는 레이저 피닝에 의한 표면개질 과정을 나타내고 있다.



<그림 5> 레이저 피닝에 의한 표면개질 과정 설명도

3.3 낙뢰 대책

고에너지 레이저가 대기 중을 진행하면, 에어로졸이 플라즈마로 전환되어 전기 도체가 높은 플라즈마 채널이 생성되어 레이저에 의한 낙뢰 유도 가능하다. 최근 이 현상을 이용한 레이저에 의한 낙뢰유도에 관련 연구가 주목받고 있다. 레이저 낙뢰유도는 높은 탐 끝에 생기는 고전압에 레이저를 거울로 집광하여 보내면 낙뢰유도 탐 끝에 레이저 플라즈마가 생성되고 이것이 위쪽을 향한 리드를 만들어 레이저 플라즈마를 따라 지상에 구름에 이르는 방전채널을 형성하여 낙뢰피해를 줄이는 방법이다. 그림 6-14에 낙뢰방지의 개념도를 나타내었다. 우리나라의 원자력발전소의 경우 대부분 해안선 근처에 위치하고 있으나, 주변 기후 변화가 심해 낙뢰사고 방지에 대한 대책이 필요한 것으로 알려져 있으며 이에 대한 대책으로 레이저에 의한 낙뢰방지가 중요한 의미를 갖고 있다.



<그림 6> 레이저 플라즈마에 의해 제어된 Z형 방전

레이저 유도의 기초 실험으로 실내에서 행해진 실험의 예를 그림 6에 나타내었다. 그림 중에 좌측 위쪽에 고전압 전극봉, 그 밑에 사람 형상의 마네킹을 놓고, 우측 아래에 접지 전극봉을 설치하였다. 이때 고전압 전극봉에 1 MV의 펄스전압을 가해 통상 공기 조건에서는 마네킹이 부서지도록 전극을 가에 주었다. 그러나 전압 인가 50 us 전에 레이저에 의해 3개의 플라즈마 채널을 생성함으로써 Z형의 방전로가 형성된 것을 볼 수 있다. 방전로의 총연장은 4 m로 레이저 플라즈마에 의한 방전로의 제어 가능성이 높은 것을 볼 수 있다. 실제 상황에서도 레이저에 의한 낙뢰 방지 실험이 진전되어 일본에서 자연 낙뢰를 유도한 것으로 보고되었다.

4. 결 론

한국원자력연구소(KAERI)에서는 고밀도 플라즈마 연구를 위한 국내 최대 고에너지 Nd:Glass 레이저 시설(KLF:Kaeri Laser Facility)을 구축하고 있다. 본 레이저 시설은 4개의 beam-line으로 각각 빔직경 108 mm, 빔에너지 250 J로 전체 1 kJ 급으로 구성되어 있다. 현재 건물 개보수 공사는 완료된 상태이며, 광학장치의 구성은 진행 중에 있다. KLF의 완공 시기는 2006년 말쯤으로 예상되어진다. 이 시설이 완성되면 고밀도 플라즈마 연구 및 EUV 발생 연구, X-선 발생 연구 등에 먼저 활용되어질 전망이다. 또한 고에너지 레이저를 이용한 연구를 희망하는 다수의 국내외의 연구그룹에게도 개방될 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] Peter J. Wisoff, Mark W. Bowers, Gaylen V. Erbert, Donald F. Browning, Donald R. Jedlovec, "NIF Injection Laser System", Proceedings of SPIE, 5341, 146-155, 2004
 [2] S. K. Hong, C. H. Lim *et al.*, "Simulation of High-Energy Laser Amplifier System", Advanced Lasers and Their Applications, 161-162, 2006
 [3] S. K. Hong, C. H. Lim *et al.*, "Improved Spatial Filter and Serrated Aperture for High-Energy Pulsed Lasers", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, P07A12, 2006