고에너지레이저 및 응용연구

글/한국원자력연구원 임창환

1960년대 초에 시작된 레이저는 초기의 고체, 액체, 기체 레이저 형태를 지나 광섬유, 반도체레이저 등 다양한 형태의 레이저로 진화를 거듭했으며 각종 의료기기, 전자제품 등에 널리 쓰이게 되면서 우리 생활에도 직접, 간접적으로 다가와 있다.

레이저의 시간 영역은 나노초(10^{-9} sec), 피코초(10^{-12} sec)를 지나 펨토초(10^{-15} sec), 아토초(10^{-18} sec)까지 확장되고 있어 지금까지 경험할 수 없었던 전혀 새로운 시간 세계를 우리에게 보여주고 있다. 또한 펄스 당 에너지 역시 수 J급에서 수백만 J에까지 이르는 높은 에너지의 레이저가 개발되면서 초신성 폭발, 상대론적 플라즈마, 핵융합 등 우주에서 일어나는 현상을 실험실에서도 재현할 수 있게 되었다.

이중에서도 미국의 NIF (National Ignition Facility), 프랑스의 LMJ (Laser Mega-Joule)와 같은 대형 고에너지레이저 시설은 바닥면적만 미식축구 경기장의 3배에 이를 정도의 크기로 지금까지의 모든 다른 레이저를 압도하는 규모를 자랑하고 있다.

1996년 미국은 지난 30년간 레이저 경험을 총망라하여 연료에 조사된 레이저에너지 보다 큰 핵융합에너지를 얻을 수 있는 NIF(National Ignition Facility)를 건조하기 시작하였다. 2009년 완공을 앞두고 있는 NIF는 다중 증폭을 이용하는 192개의 빔라인으로 구성되어 있으며 총 1.8MJ (1.8×106 J)의 에너지를 갖는다. NIF는 최종단에서 1.8MJ에 이르는 큰 에너지를 갖고 있지만, 그 시작은 수 ㎛의 빔 직경에서 수 nJ (10^{-9} J)의 약한 에너지를 갖는 광섬유 레이저 발진기를 사용한다. 직경 수백 ㎛의 구형의 연료효율을 높이기 위하여 광섬유 레이저를 시간과 주파수 영역에서 각각 성형한 후 전치 증폭기로 보내지며, 이와 같이 성형된 레이저 빔은 사중-통과 전치증폭기에 의해서 약 22J까지 증폭된다. NIF의 증폭기는 광공동 증폭기(cavity amplifier)와 부스터 증폭기(booster amplifier)로 구성되며, 빔당 총 16개의 Nd 도핑된 인산 글라스 판(glass slab)이 Brewster 각도로 배열되어 있다. NIF에서 글래스를 여기하기 위해서 사용된 섬광등 수는 100kJ급의 NOVA에 비해서 1/2 정도에 지나지 않지만 레이저 에너지는 약 40배 정도로 높게 설계되어 있다. 플라즈마 전극을 이용한 대구경의 고속 광학스위치는 NIF의 다중 증폭을 가능하게 하였으며, 이와 같은 첨단소자의 사용으로 인하여 NIF가 지금까지의 다른 고에너지레이저에 비해

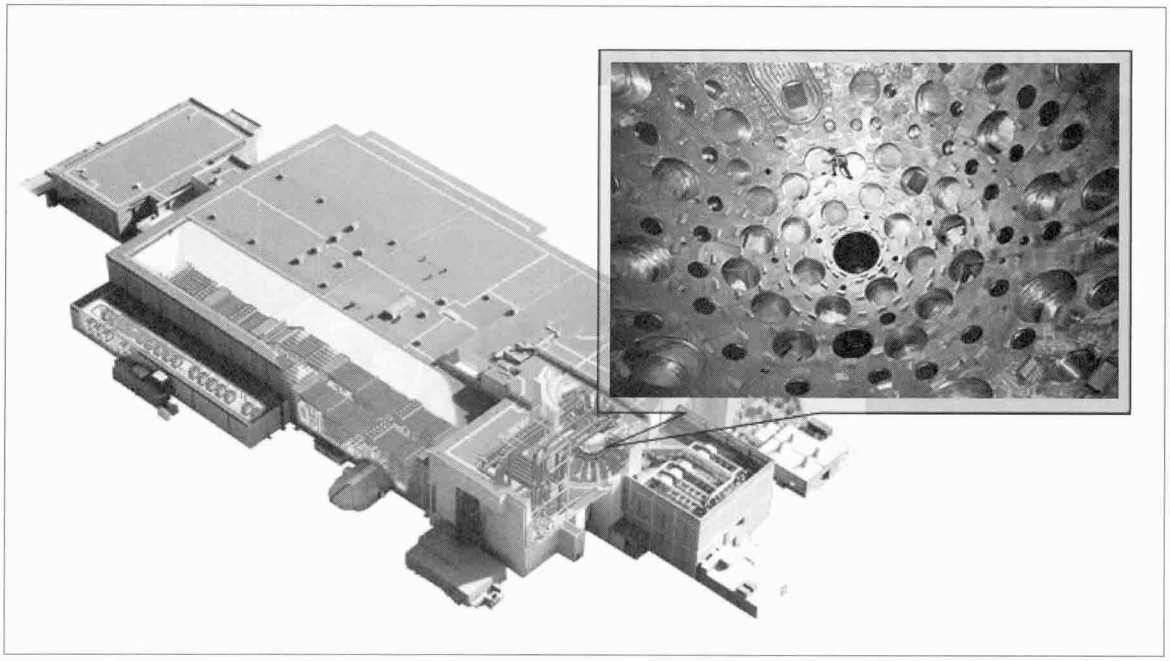

그림 1. 미국 Lawrence Livermore National Laboratory에 설치된 세계 최대 레이저 시설 NIF(National Ignition Facility). NIF는 192개 빔라인으로 구성되었으며 자외선 영역에서 총 레이저에너지는 1.8 MJ이다. 건물 바닥 면적만도 미식축구경기장의 3배이며, 타겟이 설치되는 챔버의 직경만도 10m에 이른다.(http://www.anthonares.net/2006/02/imploding-pellets-fusion-and-the-worlds-biggest-laser.html)

높은 효율을 갖게 되었다.

미국의 NIF 시설 구축은 다른 나라에도 큰 영향을 미쳐 프랑스의 LMJ (Laser Mega Joule), 일본의 Koyo, 중국의 SG III (Sheng Gwang III) 등과 같은 초대형 고에너지레이저 프로그램을 촉발하는 계기가 되었다.

한편, 2000년 일본에서는 나노초 영역의 레이저인 Gekko XII에 13번째 빔라인으로 1PW(1015 W; 1 kJ, $1x10^{-9}$ sec)의 점화용 고출력, 고에너지레이저를 추가하여 기존의 관성핵융합 방식에 비해 효율이 100배 이상 높은 고속점화에 의한 핵융합 실증에 성공하였다.

기존의 관성핵융합은 고에너지의 나노초(10^{-9} sec) 레이저를 핵융합 연료에 집속함으로써 온도와 밀도를 동시에 높이는 중심점화 방식으로 입력 에너지보다 큰 핵융합에너지를 얻는 임계값을 넘기 위해서는 적어도 백만 J(MJ) 이상의 레이저에너지를 필요로 하고 있다. 1억도의 온도와 $1kg/cm^3$ 이상 밀도의 고에너지밀도 플라즈마를 얻기 위해서는 연료의 균일한 압축이 중요하며 이를 위하여 레이저 빔품질 제어, 플라즈마 불안정성, 새로운 연료 개발 등 많은 관련 연구가 수반되었다. 이에 반해 고속점화는 수십 kJ의 레이저를 이용하여 플라즈마를 압축한 상태에서 PW급의 점화용 레이저를 조사하며 이때 국소적으로 발생한 핵융합에너지를 이용하여 남은 고밀도의 핵융합 연료를 연소시키는 방식이다. 고속점화는 압축과 점화를 분리한 가솔린 엔진과 유사한 개념으로 고속점화를 이용하는 핵융합은 중심점화 방식에 비해 엄격한 빔균일성과 플라즈마 불안정 제어를 요구하지 않을 뿐 아니라, 효율 또한 매우 높아 100kJ급 레이저에서도 충분히 핵융합 임계값을 넘을 것으로 예상하고 있다.

고속점화 실험은 상용 핵융합 가능성을 보다 높이는 중요한 계기가 되었으나, 이에 대한 물리적 이해는 아주 일부분에 국한되어 있어 보다 체계적인 연구 필요성이 제기되어 왔다. 고속점화를 보다 정밀하게 검증하기 위하여 일본의 FIREX, 미국의 OMEGA-EP, NIF-PW, 프랑스 LIL, 영국의 Vucan 등 기존 압축용 고에너지레이저 시설에 수 kJ에서 수십 kJ의 고속점화용 레이저를 추가 건설하고 있다. 또한 최근 유럽에서는 고속점화의 레이저핵융합을 이용한 전기 생산을 실증하기 위한 100 kJ급 HiPER 레이저 시설 설계가 시작되었다. 고속점화는 레이저핵융합뿐 아니라 Z-pinch, 이온빔 등 다른 핵융합 방식에도 적용 가능하며 이를 실증하기 위한 kJ급 점화용 레이저가 기존 시설에 추가로 설치되었다.

고에너지레이저를 이용하면 고체밀도의 수십 배에 달하는 $1kg/cm^3$의 초고밀도와 1억도 정도의 초고온 상태를 만들 수 있다. 이와 같은 초고온, 초고압, 초고밀도의 플라즈마에서는 빛에 가까운 속도로 플라즈마가 움직이기 때문에 상대론을 포함하는 새로운 유체 해석이 필요하며, 금속수소와 같은 전혀 경험하지 못한 새로운 물질 상태방정식에 대한 이해도 요구된다. 2004년 미국 NRC (National Research Council)는 초고온,

초고밀도, 초고압 플라즈마에 대한 보다 폭넓은 연구를 진행하기 위하여 고에너지밀도 플라즈마 과학을 quark gluon, 펨토 과학과 함께 국가적으로 주목해야할 3대 과학 분야 중 하나로 선정하였다. 고에너지밀도 플라즈마 연구는 실험실 우주물리, 레이저 입자가속, 유체방사광 등 새로운 기초분야를 다루고 있으며, 이는 고속점화를 포함한 핵융합 전반에 대한 보다 폭넓고 정확한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 고에너지레이저는 새롭게 주목받고 있는 고에너지밀도 플라즈마 과학 연구에 가장 적합한 것으로 알려져 있으며 이를 위하여 Petal, Texas PW, LIL 등 많은 kJ급 레이저 시설이 신규로 건조되고 있다.

우리나라에서는 1993년에 "신명" 레이저를 건조한 바가 있으며, 2008년 3월 4개 빔라인으로 구성된 1 kJ Nd:Glass 레이저 시설을 한국원자력연구원에 완공하였다. 한국원자력연구원의 레이저 시설(KLF; KAERI Laser Facility)은 나노초 영역에서 임의 파형의 레이저를 낼 수 있도록 광섬유레이저를 기반으로 하는 전단부를 설치하여 다양한 플라즈마 실험이 가능하도록 하였다. 4개의 빔라인을 이용한 내폭 플라즈마 압축도 가능하기 때문에 고에너지밀도 플라즈마 뿐 아니라 레이저핵융합에 대한 기초연구도 진행될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 한

그림 2. 한국원자력연구원이 구축한 국내 최대 규모의 1 kJ 고에너지레이저 시설. 7단 증폭된 레이저에서 4개 빔라인을 동시에 제공할 수 있으며, 다양한 실험을 위해 임의파형 발진기, 초단펄스 발진기 등을 준비 중에 있다.

국원자력연구원의 고에너지레이저 시설 건조는 그 동안 선진강대국에 의해 주도되었던 대형 레이저를 이용한 연구 분야에 중간 진입뿐 아니라 국내의 고에너지밀도 플라즈마, 양자공학과 같은 기초분야와 극자외선 광원 개발, 고품질 레이저 제작, 가공 및 계측 등 산업분야의 활성화에 기여할 것으로 기대한다.

실린더렌즈를 사용하는 Anamorphic Exposure렌즈 개발성공

(주)프로옵틱스 www.prooptics.co.kr

* '04년 : 부품소재 전문기업
* '05년 : 부설연구소 인정, 벤처기업 인증서 취득
* '06년 : INNO-BIZ 인증서 취득
* '07년 : NEP 신제품 인증서 취득

• 주소 : 경기도 이천시 부발읍 아미1리 475번지
• 전화 : 031-635-9732, 636-9732
• 팩스 : 031-635-8732
• 대표이사 : 이학박사 정진호(011-304-1353)

* Optical System Design & Manufacturing
* Ultra-High Precision Optical Axis Alignment(Tilt Free Manufacturing/Tilt Free Alignment)
* PCB, LCD inspection optics (8k, 12k Line CCD) Fixed Focus Lens / Zoom Lens
* 0.3um Wafer Inspection Optics (8k, 12k Line CCD)
* PCB, LCD Exposure Optics / Mask Less Exposure Optics
* 3D HD-Camera Lens / 3D Projection Engine / 3D Microscope
* Fingerprint Awareness Lens
* Radiation Resistant CCTV Zoom Lens

고해상력시대에 아직도 범용렌즈를 사용하고 계십니까?
ProOptics의 맞춤형렌즈는 귀사의 장비 성능을 한층 높여줄 것입니다.