

# 한국원자력연구소 레이저 및 양자광학 분야의 연구활동

이 종 민

한국원자력연구소 기반기술개발단 단장

## 1. 머리말

원자력 분야에서 레이저기술은 레이저 원격계측 및 비파괴 검사, 원자력소재의 정밀가공 및 표면처리, 폐원자로 원격해체 등에 활용된다. 또한 분광기술은 의료용 및 산업용 안정 동위원소 추출, 방사성폐기물의 자원화, 극미량 분석기술을 통한 원전주변 환경감시 등 그 응용범위가 매우 넓다. 특히 레이저 및 양자광학 기술은 원자력의 기본현상인 원자핵분열 반응을 효율적으로 사용하기 위해서 원자를 중심으로 미시적 세계의 에너지 상호작용에 대한 포괄적인 연구를 가능하게 하는 분야로서, 2000년대 원자력 선진국 진입은 원자력발전소와 같은 대규모의 복잡한 시스템에 양자광학기술과 같은 미시적 요소 기술을 어떻게 효율적으로 접목시키느냐에 달려 있다.

## 2. 고출력 레이저 개발 분야

### 2.1 파장가변 색소레이저

파장가변 색소레이저 분야의 개발은 10년 전부터 수행되어 왔다. 다양한 원자분광 연구에 사용할 수 있는 레이저 광원으로 사용하기 위하여 보다 좁은 선폭과 보다 광대역에 걸쳐 발진이 가능한 레이저 개발에 힘을 기울였으며, 비선형 레이저광학 연구를 위하여 레이저 고출력화에도 노력하였다. 이로써 현재 펄스형 색소레이저의 단일종모드 발진과 다단계 증폭시스템을 구현하였다. 고분해분광학용 레이저 개발을 위하여 펄스형 색소레이저에서 단일종모드 발진에 성공하였다. 발진선폭은 500 MHz 이하로서 매우 좁은 선폭을 자랑한다. 더욱이 이 발진기는 THz 이상에 걸쳐 모드호핑(mode hopping) 없이 주사(scanning)가 가능하여 원자분광용 레이저 발진기로서 손색이 없다. 또한 발진기 내에 wedge prism을 삽입하고 이를 회전시킴으로써 초정밀 주사가 가능하게 하였다. 이 주사장치는 일반적인 동조거울 회전방식보다 200배 이상의 정밀도를 갖으며, 이는 색소레이저 뿐만 아니라, Ti-sapphire, 그리고 OPO 등 여러 파장가변 레이저에 다양하게 응용 가능하다.

고안정 단일종모드 발진기를 개발하기 위하여 연속발진 색소레이저를 펄스증폭하였다. 이에 사용되는 증폭셀은 입력광이 셀내부를 두 번 왕복할 수 있게 제작하여 증폭효율을 높이도록 하였다. 그 결과 증폭기에 입력되는 출력이 186 mW일 때 최대 0.35 mJ의 에너지를 얻었으며, 이때 에너지 전환효율은 16.1%이고 증폭비는  $10^5$  정도로 크게 증폭되었다. 이처럼 증폭된 레이저 광의 펄스폭은 21 nsec이고, 선폭은 80 MHz로서 Fourier 극한값에 근접한다. 연속발진 레이저의 펄스증폭된 출력이나 단일종모드 발진 레이저의 출력과 같이 출력이 작은 경우 레이저 광을 증폭할 때 증폭비가 비교적 낮다. 이를 극복하기 위하여 적은 입력에너지에서도 효율이 높은 종공진기형 재생증폭기를 개발하였다. 그결과 출력에너지가 16배로 크게 증가하였다. 이는 일반 증폭기가 10배 정도 증가하는 것과 비교할 때 매우 큰 값이다. 이와 같이 재생증폭기를 사용함으로써 전치 및 주증폭기에 효율적인 증폭이 이루어지도록 하였다.

이상에서 개발된 시스템에 전치 및 주증폭기를 추가로 설치함으로써 파장가변레이저 다단증폭계열을 완성시켰다. 펄핑광의 출력이 작은 전치증폭기에는 단면회평평을 하였고, 주증폭기에는 고출력이 가능하게 양면회평평 방식을 채택하였다. 각기 다른 펄핑방향과 편광상태에 따른 출력변화를 조사하였다. 그 결과 주증폭기의 최대효율은 60%이며, 레이저 시스템 총효율은 25%이고, 최대출력 50 mJ의 에너지를 얻었다. 이같은 고출력 레이저를 산업계 및 학계에서 활용할 수 있도록 하기 위하여 레이저 상품화를 추진하였다. 이 레이저는 2단 증폭계를 갖으며, 파장제어는 전용 컨트롤러 및 PC로 가능하다. 현재 유명대학에 수대의 레이저를 판매하였다. 대부분의 색소레이저가 가시영역에서 발진된다. 본 연구팀에서는 파장가변 영역을 더욱 확장하기 위한 다양한 방법을 개발하였다. 자외선 영역의 레이저 광을 얻기 위하여 색소레이저로부터 제2고조파를 발생시켰다. 적외선 영역의 레이저 광을 얻기 위한 연구도 계속 수행하였으며, 그 결과 Ti-sapphire, OPO, LiSAF 등의 다양한 레이저를 개발하였다. 이로써 우리 연구팀에서는 적외선에서 자외선에 걸친 모든 광원을 개발하였다. 현재 이들 광원에 대한 출력 증가에 노력하고 있으며, 향후 이들을 상품화시켜 첨단산

업에서 요구되는 다양한 수요에 부응하고자 한다.

## 2.2 산업용 고체레이저

산업용 고체레이저 기술 개발분야에서는 Lamp 여기 방식을 이용한 다단형 kW급의 Nd:YAG 레이저의 개발과 Diode Laser Pumped Solid State Laser(DPSSL)에 대한 연구를 수행하고 있다. kW급의 Nd:YAG 레이저 개발 연구 내용은 먼저 레이저 발진 부분의 원천기술이라고 할 수 있는 레이저 pumping chamber의 최적화이다. 최적화 연구를 토대로 reflector의 반사면을 거울면으로 정밀가공 후 금(gold) 코팅한 gold reflector와 반사면의 넓이를 최대한 줄이는 구조를 갖는 ceramic을 재료로 하는 diffuse type pumping reflector에 대한 특성을 조사하는 연구를 수행하였다. Gold reflector는 반사면이 기본적으로 거울면이므로 램프를 레이저 봉에 결상시키는 기하학적인 구조를 갖는다. 이 방법의 장점은 레이저 봉 중앙부위가 강하게 펌핑되므로 저차모드의 펄스형 발진이나 낮은 입력의 연속발진형에 유리한 구조이나 레이저봉 내의 펌핑 균일도가 떨어져 타원형의 출력빔이 발진되며 반경 방향으로 온도구배가 커서 열 렌즈 효과가 커지는 단점이 있다. Ceramic reflector는 반사면이 산란면(diffuse surface)이므로 레이저 봉내의 균일한 펌핑을 기대할 수 있다. 반사율이 금(gold)보다 크므로 펌핑 효율이 보다 나으며 균일한 열분포로 인해 열렌즈 효과가 비교적 약하여 kW급 고출력 연속 및 펄스형 발진 레이저에 적당하다.

그림 1과 같은 kW 출력발진에 필수적인 다단 레이저 공진기(레이저 공진기내에 복수의 pumping chamber가 직렬형태로 위치하는 공진기)의 이론적 분석에 기초하여 단위 레이저봉 당 500~550 W의 출력을 얻도록 설계 제작하여 단위 공진기당(L) 출력과 빔 parameter product를 측정하였다. 다중 레이저봉 공진기에서 레이저 빔 parameter product는 열 유도에 의한 파면 왜곡 등을 무시한다면 단위 레이저봉에서 얻어지는 수치가 보존됨을 확인할 수 있다. 실험에 사용되는 레이저봉은 7×160 mm Nd:YAG이며 Nd<sup>3+</sup>의 dopant rate는 약 0.8%이다. 펌핑광원은 내경 7 mm, 방전길이 145 mm인 Krypton arc lamp이다. 한편 레이저 발진을 위해 필수적인 램프의 전원공급장치를 우

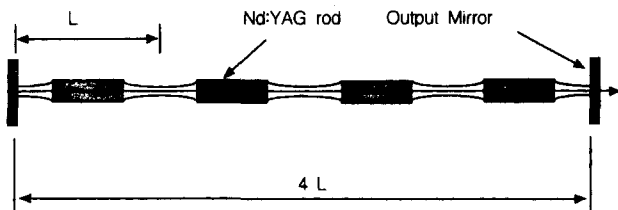


그림 1. 다중 레이저 봉을 포함한 레이저 공진기 구조.

리 환경에 맞게 독자적으로 설계한 후 제작하였다. 이 전원공급 장치의 특징은 추후 간편한 유지보수 및 제작을 위하여 모듈 형태로 제작된 점이다.

아울러 레이저 장치의 주요 부분인 냉각장치도 본 레이저가 최대의 성능을 보일 수 있도록 독자적으로 설계하여 제작하였다. 냉각장치 역시 간편한 유지보수 및 조립을 위하여 모듈 형태로 제작되었다. 현재 2개의 레이저봉을 배열하여 1 kW의 레이저 평균 출력을 내는 시스템을 완성하여 레이저 빔의 광섬유 전송실험을 하고 있는데, 전송용 광섬유로는 core의 직경이 800 μm이고, 길이가 25 m, 개구수가 0.22인 step index 광섬유를 사용하여 최대 950 W를 광섬유에 입력하였을 때 900 W를 전송시킬 수 있다. 이때 광섬유 전송 효율(입사렌즈와 광섬유를 투과한 후의 레이저 출력/광섬유 전송전의 레이저 출력)은 95% 정도임을 확인하였다. 더불어 수 kW까지 출력을 높여야 하는 연구를 병행하여 수행하고 있다.

DPSSL은 기존의 flashlamp pumped 고체레이저의 flashlamp를 diode laser로 교체한 것이다. Flashlamp는 방전시 넓은 대역의 빛이 발생한다. 하지만 한정적인 레이저 흡수대역(600~800 nm)을 갖는 Nd:YAG 레이저봉에 대하여 펌핑효율이 낮고, 필요없는 열이 많이 발생한다. 필요없는 열을 식히기 위하여 부가적인 냉각장치가 필요하게 되고, 또한 출력효율이 낮기 때문에 정도 이상의 전원 공급장치가 필요한 단점이 있다. 이에 반하여 Laser diode는 자체 출력효율이 높고 또한 Nd:YAG 레이저봉의 주흡수대역에 해당하는 레이저 파장(808 nm)을 발생시킬 수 있으므로 레이저 봉에서의 열발생을 최소로 줄일 수 있어 장치의 소형화와 고효율화가 가능하다. 그리고 수명 또한 flashlamp의 10배 이상이므로 장시간 중단없이 안정적으로 레이저를 운용할 수 있다. 이러한 유지보수에 유리한 조건 등으로 인하여 각광을 받고 있는 Laser diode를 pumping source로 하는 중펌핑과 측면펌핑 방식의 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>에 대한 연구를 병행하여 수행하고 있다.

현재 연구중인 DPSSL에 사용하는 laser diode bar는 최대 첨두 출력은 60 A 정도의 전류를 흘려주었을 때 50 W 정도이며, 최대 펄스 폭은 350 μsec이고 이때 펄스당 에너지는 18 mJ 정도이다. Duty factor는 최대 40%까지 가능하므로 최대 1.1 kHz까지 가능하다. 횡펌핑 구조에서는 여러 가지 형태와 재질의 reflector를 가질 수 있는데 본 연구실에서는 자체 설계한 ceramic reflector를 사용하고 있다. 레이저의 출력을 높이기 위해서는 여러 개의 laser diode bar를 직렬 고밀도로 packing해야 하는데 이에 많은 연구와 고도의 전문기술이 필요하다. 현재 본 연구실에서는 5개의 laser diode bar 직렬로 packing하여 실험을 수행하고 있다. 다이오드 레이저의 전원공급장치는

저전압 대전류 전원공급 장치로서 독자적으로 자체 설계 제작하였다. 전원 장치는 laser diode bar 10개를 직렬 packing한 것을 구동할 수 있는 최대 전류가 75 A, 최대전압 30 V까지 조절 가능하고 외부에서 function generator 등을 이용하여 펄스폭과 반복율을 조절할 수 있는 0.5 kW급으로 제작되었다.

### 2.3 의료용 금속증기레이저

최근 레이저의 의료분야 응용이 급속히 확대되고 있으며 새로운 파장과 안정된 성능을 가진 레이저 광원이 요구되고 있는 실정이다. 피부반점 치료분야에 사용되고 있는 레이저로는 구리증기 레이저(CVL), Nd:YAG 레이저, 루비 레이저, 아르곤 이온 레이저, 크립톤 이온 레이저, 색소 레이저, CO<sub>2</sub> 레이저 등 다수가 있다. 각 레이저들은 파장, 노출시간(펄스폭), 출력, 빔의 초점크기(spot size) 등 고유의 특성을 가지기 때문에 인접 세포를 파괴하지 않고 병변을 치료하기 위해서는 각 병변에 유효한 레이저의 개발이 필수요건이다. CVL은 고출력, 초단펄스, 고반복율의 초록색(511 nm)과 노란색(578 nm)의 두 개의 파장을 갖는 가시광 레이저로 511 nm의 경우 epidermal pigmented lesions의 치료에 적합한 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라 578 nm의 경우 vascular lesions에 효과적인 것으로 검증되어 있다. CVL로 치료가능한 반점의 종류로는 telangiectasias, port wine stains, cafe-au-lait, lentiginos, ephelides, nevocellular nevi, epidermal melanoses 등을 포함하여 다수가 임상보고되어 있다. 또한 CVL은 레이저 매질로 사용되고 있는 구리를 금(gold)으로 교체할 경우 PDT(Photo-Dynamic Therapy) 방법에 의한 암치료의 광원으로 쓰일 수 있다.

현재 개발중인 CVL은 레이저출력이 최대 6 W이며, 레이저의 동작모드는 단속펄스와 연속펄스로 사용이 가능하다. 연속펄스 동작시 레이저의 반복율은 5~12 kHz까지 가변할 수 있고, 단속펄스 모드로 사용시 빔 셔터에 의해 단속펄스의 on-off 시간 간격을 조절할 수 있다. 레이저 빔은 광섬유와 집속 광학계를 사용하여 치료부위에 전달되며, 빔의 초점 크기는 집속 광학계의 초점위치를 달리하여 변화할 수 있도록 설계되었으며, 치료부위를 쉽게 조준하기 위해서 적색의 다이오드 레이저를 장치하고 있다. 집속 광학계에 의한 레이저빔의 초점크기를 최소화하기 위해서 빔의 발산을 0.4 mrad 정도로 줄일 수 있는 불안정 공진기를 옵션으로 설치할 수 있다. 레이저의 초록색과 노란색 파장은 광 필터를 사용하여 선택적으로 사용할 수 있다. 레이저의 초기발진을 위한 예열시간은 약 30분 정도이고 공냉식 냉각방식을 사용하고 있다.

레이저 장치가 고반복율에서 안정적 스위칭이 가능하도록

saturable inductor resonant 충전회로의 개선, thyatron의 수명 연장, 레이저 플라즈마관에 걸리는 전압 증가에 의한 레이저의 효율 증대, 불안정 공진기를 사용한 저발산 레이저빔에 관한 연구가 수행되었으며, 레이저 장치 사용자의 편리를 위한 레이저 제어장치의 개선에 관한 연구가 현재 진행중에 있다. 개발 중인 소형의 CVL은 의료용 뿐만 아니라 제2조화파를 발생시킬 경우 레이저 ablation을 이용한 미세가공과 lithography에 응용이 가능하고, 고속 비행체와 기체 동력학 분야의 고속촬영 장치로 사용할 수 있다.

### 2.4 차세대 자유전자레이저

자유전자레이저(Free Electron Laser, FEL)는 전자빔 가속기 기술과 레이저 기술이 결합되어 탄생한 새로운 개념의 레이저이다. 기존의 레이저가 탄산가스, 루비와 같은 기체 또는 결정체를 매질로 하여 한정된 파장을 얻을 수 있는데 비해 자유전자레이저는 전자빔의 에너지에 따라 마이크로파에서 x-선까지 광범위한 파장영역에서 원하는 임의의 파장을 얻는다는 장점을 갖고 있다. 자유전자레이저가 실용화되면 원자력산업, 의료, 의약, 환경, 국방, 물성연구, 반도체 산업, 화학공업 등 많은 산업분야에서 이용될 것으로 기대되고 있다. 특히 원자력분야에서는 방사성 폐기물의 균분리 및 유용원소 자원화, 의료 및 산업용 안정동위원소 생산, 원자력 신소재 개발, 원자 및 핵물리 연구, 극한환경 재료시험, 핵융합로 플라즈마 가열 등 광범위하게 이용될 수 있다.

한국원자력연구소에서는 밀리미터파, 원적외선, 적외선 등 여러 파장영역의 자유전자레이저 시스템 개발과 함께 고휘도 전자빔 발생연구, 이론 및 simulation code 개발, undulator 기술 개발 등 관련 기초연구를 수행하고 있다. 밀리미터파 자유전자레이저 개발은 1992년부터 본격적으로 시작되어 1994년에 국내 최초로 발전에 성공하였는데, 정전가속기를 이용한 FEL로는 세계에서 미국에 이어 두번째이다. 이 시스템은 400 keV 전자빔 회수형 정전가속기를 사용하여 파장이 3~10 mm인 레이저빔을 발생시키도록 설계되었다. 펄스 및 연속모드로 작동되며, 침투출력은 10 kW이다. 이 장치의 장점은 undulator에서 한번 발전에 사용된 전자빔이 감속관과 collector를 지나 다시 전자총으로 되돌아 가기 때문에 시스템의 효율이 매우 높다는 점이다. 계산에 의하면 전기에너지에서 빛에너지로 변환하는 효율을 60% 이상으로 높일 수 있다.

원적외선 자유전자레이저는 8 MeV 마이크로트론으로 구동되며, 파장범위는 30~50  $\mu\text{m}$ 이다. 전자빔의 에너지와 undulator의 자기장 세기를 변화시킴으로써 출력파장을 정밀하게

조절할 수 있다. 원적외선 영역에서는 기존에 개발된 광원이 많지 않고 더욱이 파장가변 영역이 좁고 출력도 매우 낮기 때문에 이 파장영역의 자유전자레이저가 개발되면 많은 분야에 이용될 수 있을 것이다. 특히 대부분의 분자의 진동에너지 준위가 이 파장영역에 걸쳐 있기 때문에 분자분광학에 매우 적합하다. 또한 표면물리, 초전도체 및 반도체 물성연구, 생물물리, 플라즈마 진단 등에도 이용될 것으로 기대된다. 마이크로트론이 자유전자레이저용 가속기로서 갖는 장점은 크기가 작고 전자빔의 질(quality)이 매우 좋다는 점이다. 현재 사용중인 마이크로트론의 지름이 70 cm이기 때문에 전체 FEL 시스템의 크기가 작은 실험실에 설치할 수 있을 정도로 작다. 같은 에너지의 전자빔을 선형가속기로 얻으려면 가속기 길이가 3~4 m에 이르기 때문에 전체 시스템의 크기가 매우 커진다. 마이크로트론의 단점은 전자빔의 침투전류가 낮아 FEL 이득이 낮다는 점이다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 주기가 짧으면서도 자기장 세기가 높고 주기수가 많은 undulator를 개발하였다.

자유전자레이저에 사용되는 전자빔은 휘도(brightness)가 높아야 한다. 즉, 전류밀도가 높고 emittance가 낮아야 한다. 전자빔의 휘도는 전자총에 의해 결정되는데, 기존의 열음극 전자총에서 발생하는 전자빔의 휘도는 매우 낮다. 최근에 광음극 고주파 전자총이 새로이 개발되고 있는데, 이것은 금속 또는 반도체 광음극에 짧은 레이저 펄스를 조사하여 발생하는 광전자빔을 고주파 전기장으로 가속하는 방법을 사용한다. 이 방법을 사용하면 기존 방법보다 10,000배 이상의 높은 휘도를 얻을 수 있다. 본 연구팀에서는 광음극 효율이 높은 금속 또는 반도체 재료의 개발과 함께 광음극용 mode-locked UV 레이저 시스템을 개발중이다. 이 광음극 전자총은 앞으로 개발될 고효율 자유전자레이저 시스템에 응용될 것이다. 자유전자레이저의 핵심요소 중의 하나는 undulator이다. 본 연구팀에서는 영구자석을 이용한 나선형 undulator를 자체기술로 개발하여 밀리미터 파 자유전자레이저 시스템에 적용한 바 있으며, 이에 대한 특허도 획득하였다. 또한 러시아 부드커 핵물리연구소와 공동으로 주기가 짧으면서도 자기장 세기가 높고 자기장을 쉽게 변화시킬 수 있는 undulator를 개발하고 있다.

자유전자레이저가 학술용에서 벗어나 산업분야에서 이용되려면 평균출력이 높아야 한다. 본 연구에서는 원자력 및 일반 산업분야에서 이용할 수 있는 고효율 자유전자레이저 시스템 개발을 목표로 개념설계와 요소기술 개발을 수행중이다. 이 시스템은 원적외선, 적외선, 자외선 및 자외선 영역에 걸쳐 파장을 변화시킬 수 있으며 평균출력이 10 kW 이상 되도록 설계되었다. 자유전자레이저의 평균출력을 높이려면 대전류 전자빔 가속기의 개발이 필수적이며, 대전류 전자빔을 가속/감속할

때 전자빔의 안정성에 대한 연구가 중요하다. 본 연구팀은 그 첫 단계로서 2 MeV, 50 mA 전자빔 가속기를 개발 중이며, 이 시스템은 1998년 상반기 중에 완성될 예정이다. 본 연구팀에서 계획하고 있는 연구과제 중의 하나는 전자빔과 레이저빔의 Compton scattering에 의한 coherent x-ray 및  $\gamma$ -ray 발생 연구이다. 전자빔의 에너지를 변화시킴으로써 출력 x-ray의 파장을 자유자재로 바꿀 수 있다. 예를 들어 레이저의 파장이 1 m이고 전자빔의 에너지가 10 MeV일 때 얻어지는 x-ray의 에너지는 1.92 keV이다. 전자빔의 에너지가 200 MeV이면 광자에너지가 1 MeV인  $\gamma$ -ray를 얻을 수 있다. Supercavity를 사용하면 레이저빔의 세기가 1000배 이상 높아져 출력의 세기를 크게 높일 수 있다. 이러한 파장가변 coherent x-ray 및  $\gamma$ -ray는 원자 및 핵물리 연구에 유용하게 이용될 것이다.

## 2.5 기타 고효율 레이저

엑시머레이저는 금속 및 재료표면이 방사능이나 유해물질로 오염된 경우 이를 ablation 방법으로 제거하기 위하여 개발하였다. 레이저 제염기술은 종래의 제염방법에 비해 원격으로 재료표면을 가공하기 때문에 작업자의 안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 재료표면의 오염된 부분만을 선택적으로 제거하여 이를 폐기처분하게 되므로 폐기물 전체의 부피를 줄일 수 있는 장점이 있다. 레이저제염에서 개발한 엑시머 레이저는 평균 출력 150 W, 1.7 Joule/pulse, 150 Hz 반복율의 레이저 발전특성을 갖고 있다. 고전압 전원장치는 LC-inversion 회로를 이용하여 구성하였으며, 포화 자기소자를 이용하여 고전압 전류펄스를 압축하는 기술을 적용함으로써 레이저 전기방전이 효과적으로 이루어지도록 하였다. 레이저 발전효율은 최대 1.7%이며, 장시간 레이저동작 안정성이 우수하고 불안정공진기를 이용한 레이저빔 발산각은 3 mrad 이하로서 우리가 개발한 엑시머 레이저는 레이저제염기술 적용에 적합하게 개발하였다.

원자력시설의 제염과 해체를 위한 레이저기술 분야에서는 레이저장치가 작업현장까지 접근이 가능하고 원격가공에 적합하여야 한다. 화학레이저인 COIL(Chemical Oxygen Iodine Laser)은 고효율레이저 발전이 가능할 뿐만 아니라 발전파장이 1.315 m로서 광섬유전송이 용이하여 원격가공에 적합한 특성을 갖고 있다. 또한 레이저 발전에 직접적으로 전기가 사용되지 않으므로 차량 탑재가 가능하여 작업현장에 쉽게 접근하여 원자력시설에서 레이저 제염 및 해체가공을 할 수 있는 장점이 있다. COIL은 일반적으로 전기를 사용하여 발전시키는 레이저와는 달리 화학적으로 생성된 여기산소로부터 오오드원자에 에너지 전달이 이루어져 레이저 발전이 된다. COIL은 크게 나

누어 여기산소발생기, 요오드혼합 초음속 노즐, 레이저 공진기 그리고 배기장치로 구성되어 있다. 여기산소 발생기에서는 과산화수소수와 수산화칼슘의 혼합용액을 염소가스와 반응을 시켜주어 여기상태의 산소를 만들어 주는데, 여기산소 발생량에 따라 레이저 출력이 결정된다고 할 수 있다. 초음속 노즐에서는 레이저 출력을 높이기 위하여 여기산소를 비롯한 대량의 가스가 흐르도록 하면서 여기산소와 요오드분자사이에 에너지 효과적으로 전달이 이루어지는 구조로 되어 있다. 초음속노즐에서 여기된 요오드 원자는 레이저 발진이 이루어진 후 배기장치로 나가게 된다. 레이저탑에서는 분사형 노즐을 이용한 여기산소발생기 및 초음속 요오드혼합노즐 그리고 steam ejector 및 root blower로 구성된 배기장치를 설계 개발하고 있으며, 2001년까지 10 kW 출력의 COIL을 개발하게 될 것이다.

### 3. 레이저분광 및 양자광학 분야

#### 3.1 레이저 공명이온화 분광학

공명 이온화 분광학(RIS; Resonance Ionization Spectroscopy)은 레이저를 사용하여 기저상태에 있는 원자를 특정한 여기준위로 공명여기시킨 후 여기상태에 있는 원자를 이온화시키므로써 이때 발생한 이온의 검출신호를 측정하여 원자의 각종 분광상수를 결정하고, 레이저와 원자의 상호작용을 규명하는 연구 분야이다. 레이저의 단색성, 고출력성, 파장가변성, 가간섭성 등의 특성을 이용하면 높은 효율로 특정 원소만 선택적으로 여기 및 이온화시킬 수 있기 때문에 이 분야는 레이저 개발과 함께 매우 활성화되었다. 레이저의 파장 발생 영역은 색소레이저의 개발과 함께 조화파 발생(harmonic generation), 주파수 혼합(frequency mixing) 등의 비선형 광학 현상 등을 이용할 수 있게 되므로써 더욱 확장되었으며, 이러한 광범위한 파장영역의 레이저빔을 이용하여 지금은 주기율표 상의 대부분 원소를 공명 여기시킬 수 있게 되었다. 한편 공명이온화 분광학을 이용한 분석법은 현존하는 여러 분석법 중에서도 가장 검출감도가 우수한 것으로 알려지게 되었으며, 원자력 산업과 관련하여 안전성의 확보 및 환경 오염 방지를 위하여 정밀 감시가 요구되는 각종 유해 원소의 검출에 유용하게 이용되고 있다.

원자력연구소에서는 중성자 흡수단면적이 커서 핵연료의 독극물로 작용하는 가돌리늄(Gd)을 비롯하여 비파괴 검사에 사용되는 이테르븀(Yb), 의료용 원소인 사마리움(Sm) 등의 희토류 원소, 환경오염 감시 대상인 카드뮴(Cd), 납(Pb), 수은(Hg) 등의 중금속 원소 등에 대하여 공명이온화 분광연구를 수행하였다. 그 결과 Gd, Sm 원소의 새로운 자동이온화 준위를 밝혀

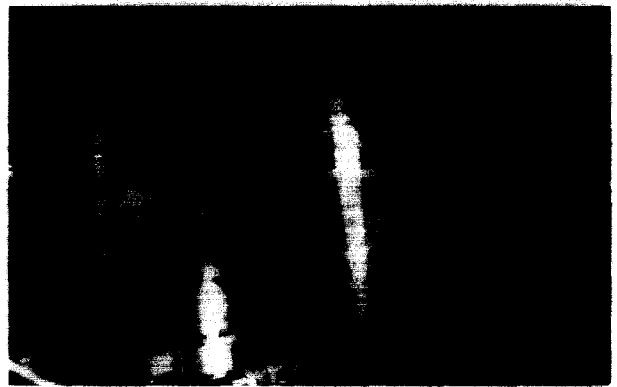


사진 1. 공명이온화 분광장치를 보여주는 사진. 3가지 색의 레이저는 렌즈에 의하여 접속되어 진공용기로 향한다. 진공용기에서는 고온의 원자증발장치를 이용하여 원자증기를 발생시키며, 이온은 TOF 질량분석기에 의하여 검출된다.

게 되었으며, Pb, Cd 등의 원소는 ppb 이하의 고분해능으로 검출할 수 있게 되었다. 다음의 사진 1은 공명이온화 분광학 연구를 수행하기 위한 실험장치를 보여준다. 레이저장치는 Nd:YAG 레이저나 엑시머 레이저를 이용하여 색소레이저를 펌핑하는 구조로 되어 있다. 색소레이저 장치에서 발생된 좁은 선폭의 파장가변 레이저빔은 원자화 장치에서 발생시킨 시료 원자를 단단계 공명 여기시킨 다음 이온화시킨다. 레이저의 선폭이 충분히 좁으므로 다른 원소가 여기될 확률은 매우 작다. 따라서 단단계 여기과정에서의 원소 선택성은 다른 여러 방법에 비하여 탁월한 장점이 있다. 원자화 장치는 필라멘트나 오븐, 전자총 등을 사용할 수 있도록 설계되어 있으므로 용점이 비교적 낮은 원소부터 높은 용점을 가진 원소까지 원자화가 가능하다. 발생된 이온은 TOF 혹은 사중극자 질량분석 장치에 의하여 질량이 분석된다. 질량분석 장치는 이온을 구성하는 동위원소의 성분비까지 정확히 측정할 수 있는 고분해능의 질량 분해능을 갖고 있으므로 원자력 산업에서 요구되는 정밀 측정을 가능하게 하고 있다.

#### 3.2 원자 광학 기술

원자광학 기술은 최근에 급속히 발전하고 있는 학문 분야 중의 하나이다. 미국의 MIT대학에서 세계 최초로 원자레이저를 실험적으로 입증하였고, 원자의 냉각 및 포획에 대한 연구 성과로 미국 스탠포드 대학교의 스티븐 추 교수, 프랑스의 코헨 타누지 교수, 그리고 미국 표준과학연구소의 윌리엄 필립스 박사가 1997년도 노벨 물리학상을 공동으로 수상함으로써 세인의 관심을 불러 일으켰다. 1960년대 초 처음으로 개발에 성공하여 불과 20여년만에 우리의 일상 생활속에 깊숙이 파고든 광학 레

이제에 비추어 볼 때, 원자광학 분야는 21세기 초에 학문적으로나 산업적으로 지대한 파급효과를 가져올 것으로 기대된다.

기존 광학이 물질로 빛을 제어하는 것에 비해 원자광학은 빛으로 물질을 조절하는 것으로서 발상의 전환이라 할 수 있다. 빛이 지닌 운동량을 물질에 전달해 줌으로써 물질의 진행방향을 바꿀 수 있으며 일정한 곳에 물질을 모을 수 있고, 또한 절대온도에 가까운 온도로 냉각시킬 수 있다. 이러한 새로운 아이디어는 새로운 물리현상을 만들어 낼 수 있으며, 더 나아가서 좀 더 정밀한 계측기 및 응용 장비의 탄생을 가능케할 것으로 기대된다. 본 연구팀은 그 동안의 원자분광학 및 레이저 분야의 축적된 연구 성과를 바탕으로 원자광학 분야의 연구를 수행하고 있다. 본 연구팀이 목표는 원자 간섭계의 개발이다. 원자간섭계는 기존의 간섭계에 비해 월등한 감도를 가질 수 있다는 점에서 무한한 활용성을 지닌다. 원자간섭계가 완성되기 위해서는 원자거울, 원자빔분할기 등의 기초 원자광학 소자의 개발이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구팀에서는 기초 광학소자의 개발을 우선적으로 추진할 예정이다. 올해에는 레이저의 소모적 힘에 의한 중원자(Yb)의 굴절실험과 이의 응용 연구를 수행 중이며, 원자간섭계 개발의 핵심이라 할 수 있는 원자빔분할기 연구와 관련하여 효율적 운동량 전달방법에 관한 이론 연구를 병행하고 있다. 최적 주파수 편이법 및 단열통과법에 의한 운동량 전달에 관해서는 Yb 및 Na 원자를 대상으로 기초 실험을 추진하고 있다. 아울러 1998년도에는 나트륨 원자에 대한 냉각 및 포획 실험을 실시할 예정이며, 이를 위해 현재 고진공 용기를 설계 제작중에 있다. 나트륨 원자를 효과적으로 포획하고 냉각하기 위해 레이저를 이용한 원자빔의 감속장치에 대한 연구도 차기년도에 수행할 예정이다.

### 3.3 원자분광 파라메타 측정기술

원자의 에너지준위, 준위수명, 원자전이선의 전이확률 등 원자분광 파라메타는 원자분광학 분야의 오랜 과제였으며, 앞으로도 지속적으로 측정되고 분석되어야 할 분야이다. 최근들어 관심의 대상이 되고 있는 희토류 원소의 경우 이러한 분광자료가 극히 부족하여 원소활용에 제한을 가하고 있고, 천문학 및 플라즈마 연구분야에서도 이러한 분광자료의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 본 연구팀은 희토류 원소의 활용과 분석을 목적으로 최적광이온화 구도 결정에 필수적인 희토류 각 원소에 대한 원자분광 파라메타를 측정하고 있으며, 이를 위해 각종 측정장비를 제작활용하고 있다. 원자의 에너지준위 연구의 주 관심사는 에너지 영역이 높은 Rydberg state와 자동이온화 준위 연구에 있다. 에너지 준위 측정에는 다단계 여기과정을 거

쳐 이온을 생산하고 최종적으로는 이온의 질량을 측정하고 분석하는 광이온화 질량분석장치를 제작하여 사용하고 있다. 원자의 radiative lifetime은 레이저로 원자를 여기시킨 후 원자에서 방출되는 형광을 광증배관으로 검출하는 레이저유도형광 측정장치를 사용하여 측정한다. 원자전이선의 전이확률은 준위수명과 가지율(branching ratio)로부터 결정되는 것이 가장 전형적인 방법이나 이 방법은 고준위 전이선간의 전이확률 결정에 적합하지 않기 때문에 본 연구팀에서는 레이저의 세기에 대한 형광 혹은 이온신호등 전이신호의 포화 현상으로부터 전이확률을 결정하는 quantum state depletion 방법을 주로 사용하고 있으며, Autler-Townes 효과를 이용한 측정방법을 연구하고 있다. 이밖에 동위원소 이동과 초미세구조 측정을 위한 Doppler-free 고분해 분광학 연구의 일환으로 희토류 원소에 대한 포화분광학, 편광분광학, POLINEX(Polarization Intermolecular Excitation Spectroscopy) 연구 등이 진행되고 있다.

### 3.4 레이저와 원자의 동력학 연구

원자와 레이저의 상호작용과 관련된 동력학적 연구는 원자의 광이온화, 원자 분광 상수의 측정, 원자광학 등의 분야에서 유용성이 커 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 본 연구팀에서는 크게 단일 원자층에 결맞음성(coherence)이 좋은 레이저가 입사할 때 원자 준위 밀도 변화 등을 다루는 분야와, 장거리 원자층을 레이저가 전파할 때 레이저와 원자의 동력학적 변화를 다루는 분야로 구분하여 수행하고 있다. 레이저가 원자에 입사하게 되면 결맞는 상호작용에 의하여 population trapping, Autler-Townes 분리, population inversion과 같은 흥미로운 물리현상이 나타나고 이러한 현상들은 밀도 행렬 방정식에 의해서 서술될 수 있다. 본 연구팀에서도 위 방법에 의해 원자의 여러 동력학적인 변화를 규명함으로써 새로운 결과를 얻고 있다. 최근에는 3준위 원자계에서 레이저의 optimal detuning 방법을 이용하여 기저준위에서 상위준위의 원자 준위의 밀도 반전을 극대화시키는 방법을 개발하였다. Optimal detuning 방법은 입사하는 레이저 강도에 따라 레이저의 파장을 공명선 근처에 적당히 어긋나게 위치시키면 레이저와 원자의 결맞는 상호작용에 의해 원자의 확률밀도가 효과적으로 반전되는 방법으로서, Yb 원자의 광이온화 실험을 통하여 타당성이 입증되었다. 현재는 위의 optimal detuning 방법과, adiabatic following 방법, 레이저의 counter-intuitive 입사 방법 등을 결합하여 보다 효율적인 밀도반전 방법에 대한 연구를 계속하고 있다.

한편 본 연구팀에서는 얇은 원자층에서의 동력학 연구에 국

한하지 않고 장거리 원자증기층을 레이저가 전파하면서 원자와 상호작용하는 현상에 대한 연구도 수행하고 있다. 레이저가 장거리 원자증기층을 전파하게 되면 레이저에 의해 원자가 여기되거나 이온화될 뿐만 아니라 역으로 레이저도 원자에 의해 여러 특성들이 변하게 되어 시간 및 공간적인 펄스 왜곡 현상이 나타난다. 본 연구팀에서는 Maxwell-Bloch 방정식을 이용하여 장거리 원자매질에서의 원자와 레이저의 동력학을 해석할 수 있는 전산 프로그램을 개발하고 있으며 더불어 장거리 원자매질을 생성할 수 있는 열 파이프 오븐을 제작하여 실험적으로 2준위 및 3준위 원자계에서 레이저의 전파특성을 규명하는 연구를 수행하고 있다.

### 3.5 원자·분자·광학 DB시스템(AMO Database System)

원자력 연구와 관련된 여러 가지 분광자료 중에서 AMO (Atomic, Molecular, and Optical) 데이터는 양자역학 연구에 기반을 두고 있으며 실험 및 이론을 통하여 얻어지게 된다. 이러한 데이터는 원자 및 분자와 관련된 연구, 레이저의 응용에 관한 연구, 핵융합에 관련된 연구, 핵연료 주기와 관련된 연구 등 첨단 연구 분야에 필수적으로 필요한 정보들이며, 실제로 생산하기에는 매우 많은 인력과 예산이 소요되는 분야이다. 미국, 일본, 프랑스 등은 이미 오래 전부터 이러한 AMO 데이터를 생산하고 생산된 데이터를 수집, 분석 및 저장하며 저장된 자료를 체계적으로 이용할 수 있게 하여 주는 데이터베이스 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 따라서 이러한 데이터를 효율적으로 받아들이고 또한 필요한 기관 및 부서에 체계적으로 배포하기 위하여는, 세계 유수의 데이터 센터와의 공조 체계를 구축하고 이들로 부터 첨단 기술 자료를 획득하며, 우리 나름대로의 최적 데이터 베이스 체계를 구성하는 것이 필요하며, 이를 위하여 AMO 데이터의 생산, 획득, 처리 및 평가를 위한 체계적 연구가 필요하게 되었다.

본 연구팀에서는 AMO DB 시스템을 구축하기 위하여 UNIX OS를 기본으로 하는 DEC사의 Alpha station 600 기종을 데이터 베이스 서버 기종으로 사용하여 12.9 GB의 디스크 데이터 저장 능력을 갖추는 전산시스템을 구성하였으며, 여기에 Apache WWW 서버 프로그램을 설치하여 50 MB 이상의 AMO bibliographic 데이터와 700 MB 이상의 분광학 데이터를 수록하였다. 이들 bibliographic 데이터는 미국의 NIST(국립표준과학연구소)로부터 입수한 원자에너지 준위와 원자의 전이확률에 관한 bibliographic 데이터로서 약 1400여개의 에너지준위 색인 자료와 약 5000여개의 원자 전이확률 색인 자료를 포함하고 있다. 한편

분광학과 관련된 numerical data file은 프랑스의 Strasbourg 대학의 DB로부터 raw data를 download하여 WWW server에 수록하였다. 현재 한국원자력연구소의 본 연구팀에서 구축하고 있는 Web site의 URL은 <http://amods.kaeri.re.kr/>이며, 미국 NIST 연구소의 AMO database의 mirror site로 되기 위하여 협의 중에 있다. 또한 일본의 NIFS연구소(핵융합과학연구소)와의 업무 협의를 통하여, NIFS에서 생산되는 AMO 관련 기술 자료를 제공받을 수 있도록 기술 협력 기반을 마련하였으며 현재 NIFS의 data report를 정기적으로 공급받고 있다. 한편 AMO 데이터의 자체 생산을 위하여 희토류 원소중의 하나인 Sm의 원자 분광 상수를 측정하여, high lying even parity 준위의 isotope shift 데이터를 생산하였으며, 이러한 데이터들은 계속적으로 amods에 축적될 예정이다.

## 4. 레이저 분광분석 기술 분야

### 4.1 서 론

양자광학기술의 대표적인 응용으로서 레이저 극미량 분석기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 레이저 분광분석 기술은 현재까지 알려진 분석방법 중 가장 감도(sensitivity)가 높고 선택성(selectivity)이 우수하여 정량·정성 분석에 탁월한 성능을 제공하므로 원자력 분야는 물론이고 일반 산업 분야에서도 널리 활용되어진다. 이를 위해 '92년 이래 동위원소 분석용 레이저 공명 광이온화 분석장치, 희토류 및 악티늄계 원소 분석용 레이저 유도 형광분석장치, 대기분석용 원격대기분석 장치를 이미 개발한 바 있다. 그간의 경험을 바탕으로 현재 추진 중인 핵심분석기술들은 회귀 방사성 핵종의 극미량 분석기술, 형광분광계 개발, 핵물질 확산 원격탐지 기술, 미세입자의 고감도 질량분석기술 등이 있다. 이러한 기술들은 원자력 시설 주변의 환경오염감시 및 오염도 원격측정을 위해 활용되며, 핵사찰용 극미량 분석기술로도 응용가능하다. 회귀 방사성 핵종 분석 장치는 현재 핵심부품 제작단계로서 '98년 개발이 완료될 경우 주대상 원소는 핵활동시 대기중으로 방출되는 Kr-95, I-129, Sr-90 등의 방사성 동위원소들이다. 원자력시설 현장에서 희토류 및 악티늄 원소분석에 직접 적용가능한 소형 형광분광계 개발에 대한 연구가 수행되고 있다. 다이오드 레이저를 사용하여 레이저시스템의 비용과 규모를 대폭 감축하였으며, 설치가 용이한 할로우 음극방전관을 사용하여 희토류 원소들에 대한 광범위한 분광분석기술이 축적되고 있다. 핵물질 확산 및 대기공해 원격탐지를 위해 중·장거리에서 발생하는 레이저 후방산란 신호관측을 통해 확산물질 분석이 가능토록 하고 있

으며, 차량탐제형 이동시스템을 현재 제작완료하여 시험운전 중에 있다. 측정대상 물질로는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub> 등의 화석연료 부산물에 의한 대기공해 물질이다. 이러한 첨단 분석기술들은 원자력분야 외에 환경공해, 반도체, 자원탐사, 연대측정 등 다양한 분야에 널리 응용이 가능하다.

#### 4.2 원자력 환경시료의 극미량 분석 기술 개발

미세입자내에 포함된 미량 핵종의 분석을 위해 Ion Trap 질량분석기술이 연구개발된다. 이 기술은 비휘발성, 불용성, 열변형성 화학물의 분석에 용이하며, 극소량의 시료를 보유하고 있을 경우 화학적 전처리없이 분석이 가능하다. 부유물질이나 먼지 등의 미세입자를 채취하여 정전기를 작용시켜 Ion Trap 내의 중앙위치에 전기장을 걸어서 부유시킨다. 연속발전 레이저를 입자에 조사시킨 후 형광을 측정하여 입자의 조성을 파악한 후, 고출력 펄스 레이저를 조사시켜 미세입자를 쪼개고 이온화시킨 후 질량분석기를 사용하여 쪼개진 작은 분자들의 질량을 분석하므로써 미시시료내에 포함된 핵종의 정량정성 분석이 가능하게 한다. 당해연도에는 50 mesh 크기의 Amberlite (XAD-7) 입자에 레이저 색소를 흡착시킨 후 아르곤 이온 레이저(420-514 nm)를 조사시켜, 입자로부터 방출되는 형광을 광검출기를 장착한 단색분광기로 관찰하였다. 미세입자내의 색소의 형광스펙트럼, 색소의 농도에 따른 형광의 크기, 그리고 입자내에 포함된 희토류 원자의 레이저 유도 형광 스펙트럼 등을 효과적으로 관찰할 수 있었다.

Hollow Cathode Glow Discharge(HCGD) 기술을 이용한 고분해능 분석기술은 다이오드 레이저와 GD 기술의 결합된 기술로서 소형이어서 현장에서 직접 사용하기에 적합하며, 고분해능이어서 용액내의 핵종분석에 적용할 수 있다. 당해연도에는 see-through형 GD 셀을 제작하여 선폭 1 MHz의 단일모드 다이오드 레이저를 사용하여 루비듐 동위원소의 포화흡수 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 그림 2는 10 ppb, 20 µl의 루비듐 표준용액을 사용하여 얻은 포화흡수 스펙트럼이다. 동위원소간의 신호들이 뚜렷이 분리되며, 이를 통해 루비듐 초미세구조에 대한 정확한 정보도 얻게 된다.

#### 4.3 방사성 물질의 확산감시 기술 개발

핵활동시 대기중으로 방출되는 희귀 동위원소들을 레이저 분광기술을 이용하여 검지할 수 있는 Rare Isotope Detection(RID) 시스템을 자체 개발하고 있다. 대기중의 희귀 동위원소들은 주로 우주선과의 핵반응에 의해 생성되는데 <sup>81,85</sup>Kr, <sup>129</sup>I, <sup>137</sup>Cs 등

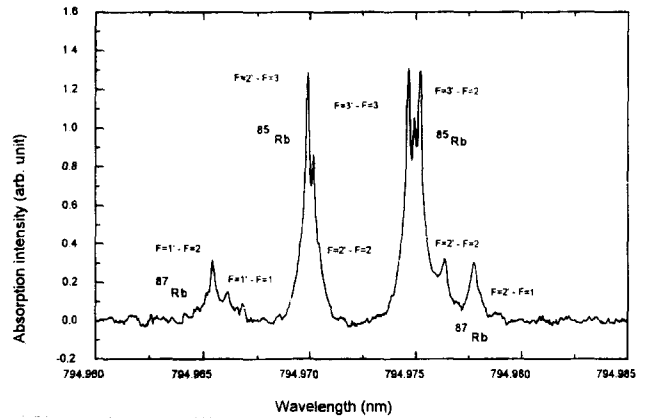


그림 2. HCGD 기술을 이용한 루비듐 원자의 포화흡수 스펙트럼.

은 지표상에서 인위적으로 행해지는 핵반응에 의해서 주로 생성된다. 이들의 상대밀도(안정 동위원소 대비)는 보통 10<sup>-10</sup> 이하로서 기존의 방법으로는 측정하기가 불가능하나 레이저 분광기술과 질량분리 기술을 병용하여 사용할 경우 가능하다. 대기 시료는 마이크로 방전에 의해 다양한 종류의 이온들로 분해되며 이는 질량분리장치에 의해 특정 핵종을 선택적으로 모은 후, 알칼리 증기를 포함하고 있는 전하교환 챔버를 통과시켜 중성 원자로 전환시킨다. 1단계 농축된 중성원자는 레이저 공명이온화 분광기술을 이용하여 고밀도화시킨 후, 이온 상태로 측정한다. 그림 3은 RID 시스템의 기본 구성도를 보여준다.

대기 중에 포함된 공해 물질의 밀도를 원격으로 측정할 수 있는 이동형 원격 대기분석 시스템이 제작된다. 대표적인 측정 대상 물질은 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 등이며, 측정거리는 5~10 km 내외까지 가능하며, 측정에 필요한 소요시간은 약 10분 이내이다. 거리분해능은 100 m 내외이며, 검지한계는 ppb~수%이다. 기본적인 측정원리는 차분흡수(differential absorption) 및 라만 분광이다. 그림 4는 라만 LIDAR 기술에 의해 측정된 연구소 주변의 수증기의 수직분포를 보여준다.

### 5. 레이저가공 및 광계측 기술 분야

#### 5.1 원전시설 보수용 레이저 가공기술

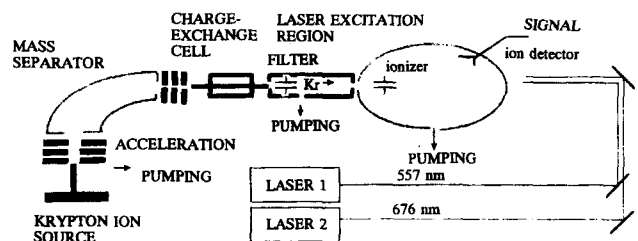


그림 3. 희귀 동위원소 극미량 분석 시스템의 기본 구성도.



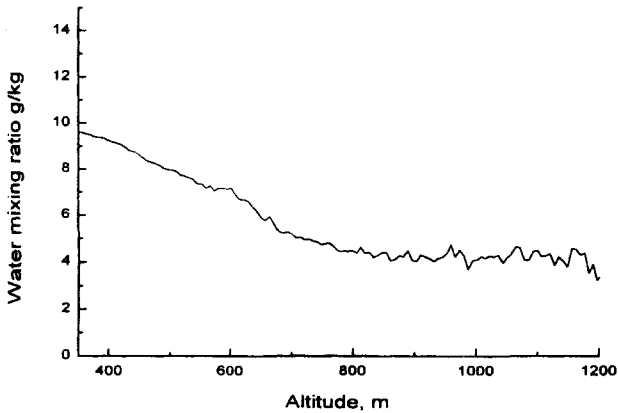


그림 4. 라만 LIDAR로 측정된 대기중 수증기의 수직분포.

원자력발전소 증기발생기 전열관의 보수/유지는 발전소 수명을 좌우하는 가장 중요한 요소중 하나이다. 한국원자력연구소에서는 원자력발전소 수명연장 및 안전성 향상을 위해서, Nd:YAG 레이저를 이용한 원격 레이저 보수용접 기술을 개발하였다.

### 5.1.1 증기발생기 전열관의 레이저 보수용접기술

증기발생기 전열관 보수용접은 그림 5와 같은 방식으로 이루어진다. 즉, 방사능 지역 밖에서 광섬유 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저를 발전하여, 약 200 m 길이의 광섬유를 이용하여 방사능 구역으로 전송한다. 결합이 있는 전열관부분에 기존의 전열관보다 적은 sleeve tube를 삽입하여 확관한 후, 레이저 용

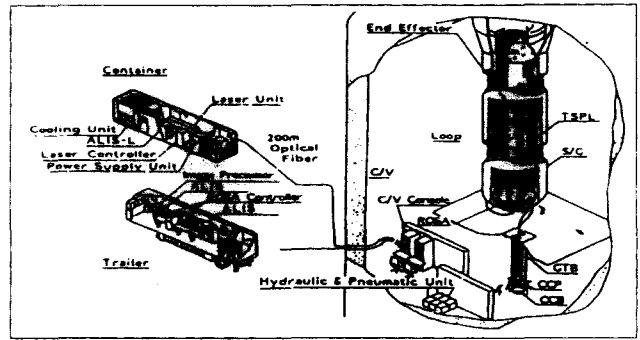


그림 5. 증기발생기 전열관 레이저 보수용접 개념도.

접 헤드를 이용하여 sleeve tube 상하 부분을 내부에서 용접하는 방식이다.

### 5.1.2 3/4" 전열관 보수용 KAERI형 용접 tool 개발

고리 1호기 증기발생기 전열관은 내경이 7/8"이며 Inconel 600이다. 이러한 전열관에 결함이 발생하면, 3/4" sleeve tube를 결함위치에 삽입하고 결함 부위 상하부분을 레이저로 용접하여 보수한다. Sleeve tube 내부에서 레이저 용접을 수행하기 위해서는 전송된 레이저의 재집속, tube 원주 방향으로 회전, cooling gas 공급 등 용접환경을 만들어 주기 위해 특수하게 설계된 용접 tools이 필요하다. 본 연구에서 개발된 3/4" 레이저 용접 tool은 그림 6과 같다. 광섬유로 전송된 레이저 빔을 집광렌즈와 반사 거울을 이용하여 축방향에서 원주방향으로 레이저빔을 꺾어 전열관 벽면에 조사한다.

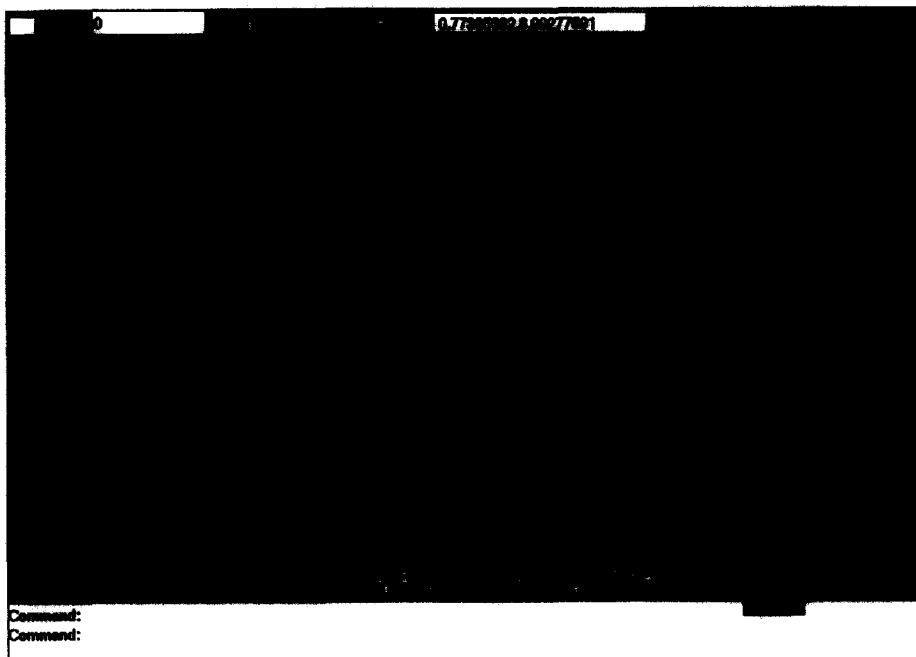


그림 6. 전열관 보수용 레이저 용접 tool.

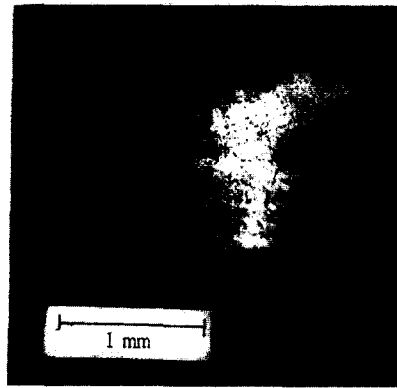
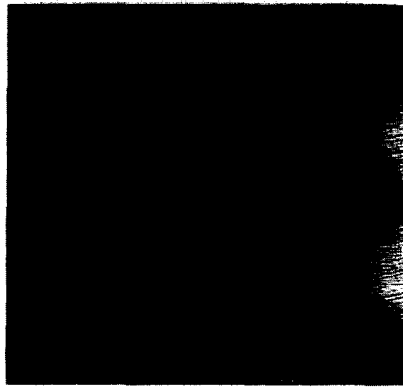


사진 2. 전열관 레이저 용접 단면도.

이때, 원주 방향으로 용접하기 위해서 회전모터를 이용하여 반사경을 회전한다. Sleeve tube 내의 용접 공간이 매우 협소하므로, 용접시 전열관 표면에서 발생하는 plume과 spatter로부터 반사경 및 집광렌즈를 보호하고, 레이저 용접시 전열관을 산화방지를 위해 보호가스를 사용한다. 또한 전열관내에서 용접 tool이 중심축을 유지하여 용접초점을 일정하게 하기 위한 기능 등이 필요하다.

### 5.1.3 레이저 보수용접조건 최적화 연구

용접 tool을 이용한 레이저 용접 실험은 실질적 레이저 보수 용접시 공작변수의 정량적 최적화 기술을 확보하는데 목적을 두었다. 실험 재질로는 현재 고리 1호기와 동일한 종류인 Inconel 600 재질에 sleeve 재질로는 Inconel 690 재질을 사용하였다. 레이저 용접의 가공 특성변수인 레이저 펄스폭, 침투출력, 반복율, 용접속도 등을 변화시켜 용접을 수행하였다. 대표적인 용접조건에 따른 결과는 펄스폭이 길수록 적은 평균출력에서 용입깊이가 크며, 전체적으로 평균출력이 증가할수록 용입깊이가 증가한다. 그러나 용접속도가 증가할수록 단위길이당 투입에너지가 감소하여 용입깊이가 줄어드는 경향이 있다. 레이저 용접부위의 경도값은 상대적으로 높게 나타나며, 모재 부위와 용접부위와의 경계면에서 비슷한 경도값을 갖는다. 따라서 레이저 용접 경계면에서 취성을 유발시키는 현상은 없을 것으로 판단된다.

### 5.1.4 레이저용접 부위의 내구성 특성분석

증기발생기 sleeve tube 레이저 용접부위의 내구성 및 건전성 평가를 위해서 PW(primary watertest) 측정, Caustic test, Sulfate test 등을 수행하였다. 실험은 용접부위에 약 30,000 PSI의 stress 가하여 auto-clave에 투입 1000시간 경과 후 용접 부위를 측정하였다. 실험 결과 용접부위에 대한 대부분의 전자현미경 사진에서는 SCC 균열이 발견되지 않았다. 본 연구는

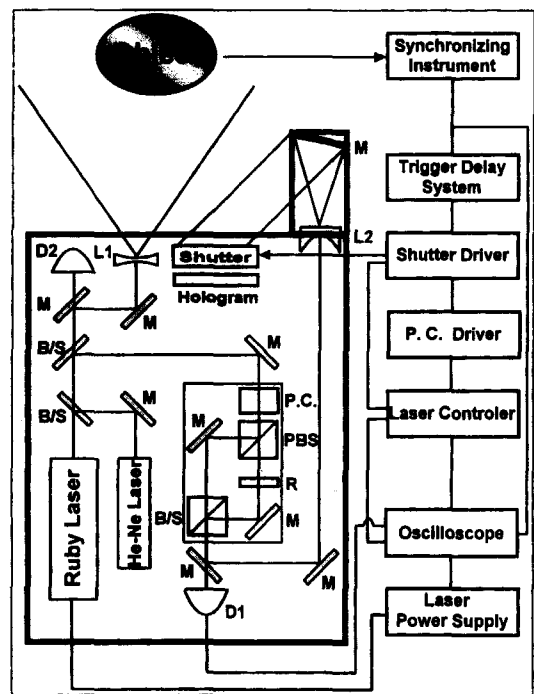


그림 7. 개발된 펄스 홀로그래피 장치 구성도.

지난 4년간의 연구를 통하여 Mock-up 시설에서 실험적으로 실증하였으며, 현재 실용화 단계이다. 또한 레이저 보수 용접의 실시간 용접 감시 및 제어기술을 개발 중으로, 레이저 용접의 신뢰성과 경제성 향상을 위한 연구를 수행 중이다.

### 5.2 홀로그래피 비파괴검사기술

홀로그래피 및 스펙클 기술은 원격, 비접촉 측정이라는 특성을 가지고 있어 원자력 분야와 같은 사용자의 안전을 최우선으로 하는 분야에 높은 활용도를 가지고 있다. 한국원자력연구소에서는 원자력 발전소 안전성 향상을 목적으로 지난 수년간 홀로그래피 비파괴 검사 및 진동감시 기술을 개발하였다.

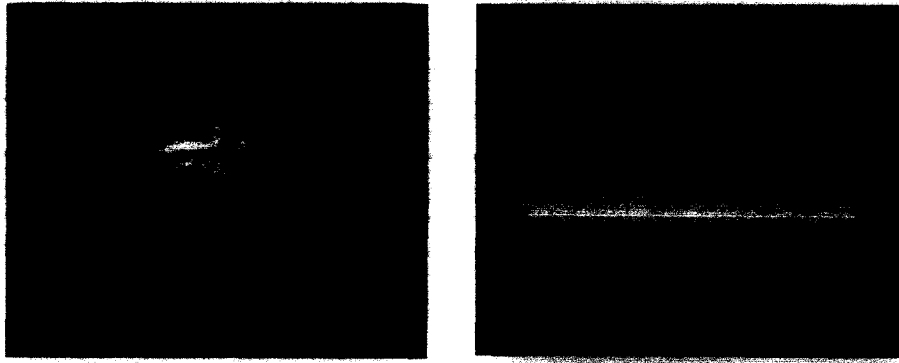


사진 3. 측방향 결함이 존재하는 압력용기의 홀로그래피 검사. (a) 초기의 홀로그래피 간섭무늬, (b) 영상처리 결과 얻은 결함.

### 5.2.1 원전시설 적용을 위한 홀로그래피 간섭계 개발

홀로그래피 기술의 적용을 위하여 진동 및 유체, 그리고 고속변형의 측정이 가능한 펄스홀로그래피 장치, 진동모드 분석 및 고속 유체 가시화를 위한 전자 스펙클 간섭계 장치, 그리고 비파괴검사용의 연속발전 홀로그래피 간섭계 장치를 개발하였다. 그림 7은 개발된 펄스 레이저 홀로그래피 간섭계 장치의 구성도이다. 펄스레이저 광원 10 J/pulse 급의 single-mode 루비 레이저를 사용하였는데, 이중노출 홀로그래피 간섭계로 활용할 수 있도록 1~1000  $\mu$ s 간격의 double-pulse 동작이 가능하다. 물체의 진동측정을 위한 동기신호는 laser vibrometer나 accelerometer를 사용하여 얻으며, 이를 delay trigger system에서 레이저 pulse와 동기시켜 원하는 순간의 진동 및 고속변형을 측정하게 된다. 측정된 결과는 quasi-heterodyne method를 사용하여 정량화할 수 있도록 하였다.

### 5.2.2 홀로그래피 비접촉 원격 결함검사기술

물체에 stress가 가해질 때의 미소변형이나 진동패턴을 홀로그래피 간섭계나 스펙클 간섭계로 정밀측정하여, 물체 내/외부의 결함을 비접촉/비파괴 방법으로 검출할 수 있다. 이 방법은 UT 등 기존의 비파괴검사 방법에 비해 속도가 빠르며, 레이저의 전송이 가능하면 원거리 검사가 가능하다는 장점이 있으며, 특히 기존의 비파괴기술의 적용이 어려운 복합재(composite material)의 내부 결함검사 방법으로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 결함측정을 위한 홀로그래피 간섭계 장치 및 결과해석 프로그램을 개발하였고, 결함 sample을 이용한 적용 실험으로 이를 실증하였다. 사진 3의 (a)는 홀로그래피 간섭계로 검사한 두께가 10 mm인 금속 steel tube 내벽의 결함의 홀로그래피 간섭무늬이고, (b)는 이를 전산처리하여 결함의 크기를 나타낸 결과이다.

### 5.2.3 유체가시화 및 고속측정기술

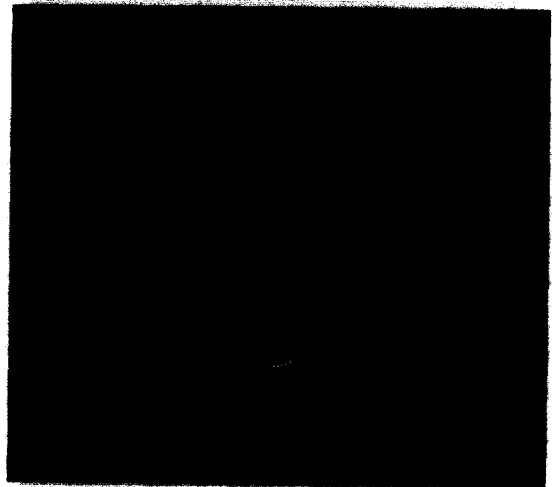


사진 4. 고속 홀로그래피에 의한 전파측정 결과.

홀로그래피 방법을 사용하여 유체의 밀도차를 가시화/기록할 수 있으며, 정량적인 밀도차의 계산이 가능하다. 또한 연속발전레이저를 사용하기 불가능한 환경이나, 고속 현상을 측정하기 위해서는 펄스 레이저 홀로그래피 방법을 사용하거나, 연속발전 홀로그래피에 다른 고속촬영 장치를 결합한 고속실시간 홀로그래피 방법을 사용할 수 있다. 사진 4는 사각의 box 안에서 고압 전기방전시 발생하는 충격파의 전파를 고속 홀로그래피 방법을 사용하여 가시화시키고, 정량적으로 처리한 결과이다.

### 5.2.4 진동모드 가시화/분석

홀로그래피/스펙클 간섭계의 활용범위 중 현재 산업적 활용이 가장 많은 분야가 부품의 규칙적인 진동의 모드 측정 및 분석이다. 부품 및 장치의 공진주파수가 전체 구조의 진동원과 같은 경우 심한 진동을 일으키게 되고, 이것은 안전성에 치명적이 된다. 홀로그래피 진동측정 장치는 크게 나누어 펄스 홀로그래피 방식과 연속발전 홀로그래피 방식이 있으며, 최근에는 홀로그래피 건판의 사용이 필요없이 CCD camera와 frame

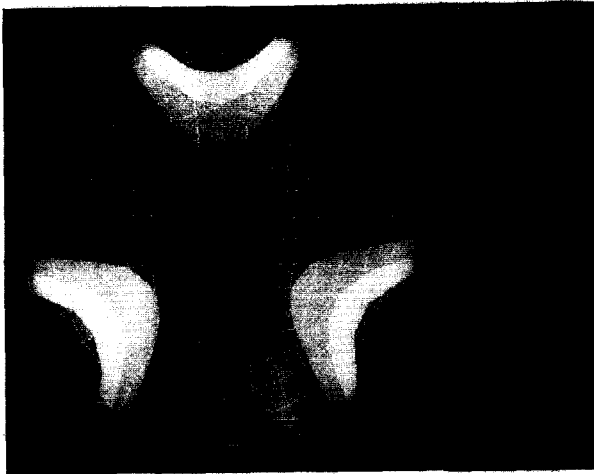


사진 5. 유한요소법(FEM)를 사용하여 계산한 원판의 진동모드.

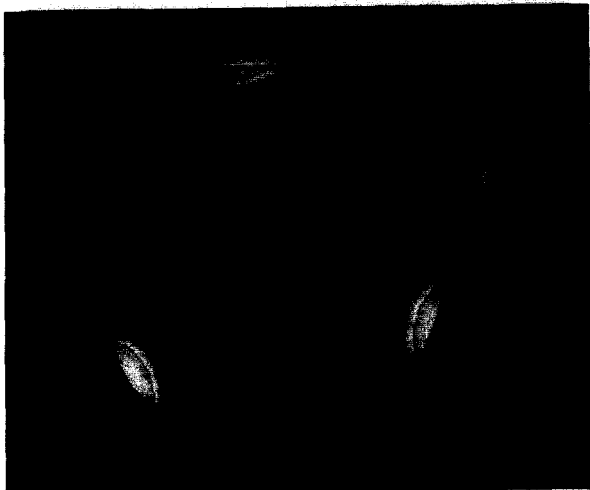


사진 6. 개발된 ESPI 장치를 사용하여 측정된 원판의 진동모드.

grabber를 사용하여 영상정보를 컴퓨터에서 처리하는 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometer)가 발전되고 있다. 본 연구에서는 진동모드의 가시화와 정량화가 가능한 Electro-Optics Holography 기술을 개발하여 부품의 진동모드 가시화 및 분석을 실증하였다. 진동모드 분석과 관련하여 국내 가전제품의 품질검사에 기술을 적용하여 기술의 유용성을 확인하였고, 앞으로의 원자력분야의 적용을 위한 기반을 마련하였다. 사진 5는 유한요소법(FEM)을 사용하여 원판의 진동모드를 simulation한 결과이고, 사진 6은 개발된 ESPI 장치를 사용하여 원판의 진동모드를 실험적으로 구한 결과이다.

이외에도 현장에 적용될 수 있는 레이저 삼각측정을 이용한 결합검출 장치를 개발하였다. 레이저 원격 정밀형상 측정장치는 Ontario Hydro에서 개발되어 CANDU의 압력관 결합검사에 적용되고 있는데, 본 연구에서는 영상배율의 방향성 확대기술을 적용하여 기존의 방식에 비해 측정 정밀도를 2배 이상 높

일 수 있는 기술을 개발하여 실험실 수준에서 실증하였다. 또한 원자로와 같은 대형 구조물의 진동을 분석할 수 있는 새로운 광계측 기술로 Canada의 Ontario Hydro에서 CANDU 원자로에서 압력관의 마모 이상 유무 검사에 활용하여 보수기간을 단축하는데 크게 기여한 레이저 도플러 진동측정기술과 레이저 주사기술을 이용한 scanning 레이저 진동측정 장치를 개발하여 성능시험 중이다.

### 5.3 능동광학기술개발

또한 본 연구에서는 연구소에서 보유하고 있는 하나로 등의 연구로에서 원자로 가동 중의 핵연료 진동을 원격으로 감시기 위한 목적으로, 유동체 내에 있는 물체의 진동측정이 가능한 능동광학 레이저 진동측정 기술을 개발하고 있다. 원자로(nuclear reactor)는 설계부터 제작검사에 이르기까지 진동에 대한 많은 기준을 충족하여야 하지만, 실제 가동중의 핵연료는 고속, 고압의 냉각수로 인해 심한 진동을 일으키며, 이에 대한 감시는 원자로 안전성에 아주 중요하다. 그러나 지금까지 가동 중인 원자로내의 극한상황에서 핵연료 진동을 비접촉/원격으로 감시할 수 있는 기술은 거의 없었다. 레이저 도플러 진동측정장치(Laser Doppler Vibrometer, 이하 LDV)는 레이저의 도플러 파장이동을 이용하는 원격 진동측정장치로, 수십미터 이상의 원거리 진동감시나 비접촉 진동측정에 많이 사용된다. 그러나 가동 중인 원자로에서는 빠른 냉각수의 유동으로 인해 레이저 파면이 심하게 변형되고, 따라서 간섭계의 원리를 이용하는 LDV의 적용이 어렵다.

능동광학기술(Active or Adaptive Optics) 기술은 광학계를 지나는 빛의 파면을 순간적으로 측정하고, 광학계가 위상을 보상하도록 움직여, 파면왜곡을 보정하는 최신기술이다. 1953년 Horace Babcock에 의해 최초로 제안되었지만 당시에는 실현이 어려웠고, 1980년대에 들어서 실증되면서 미·소를 중심으로 위성관측 등 군용으로 개발되었다. 그 동안 핵심방위기술로 자료가 공개되지 않았으나, 91년 이후 제한이 풀리면서 현재에는 군용 뿐만 아니라 천체망원경, 레이저 핵융합, free-air optical communication, 고품위 의료영상, 레이저 동위원소 분리, 그리고 고출력 레이저가공 분야 등 일반 산업에서 활용되고 있다. 그동안 발전된 Adaptive Optics 기술의 대부분은 대기유동에 의한 영상과 레이저 파면의 왜곡을 보정하는 것이다. 한국 원자력연구소에서 개발 중인 능동광학 LDV 기술은 물동의 밀도구배가 있는 유동층을 전파하는 레이저의 파면을 능동광학계를 사용하여 보정함으로써, 수십 meter의 냉각수에 잠겨 있는 원자로 핵연료의 진동을 LDV로 측정/감시하게 된다.

**표 1. 한국원자력연구소의 레이저광학기술을 실용화중인 산업체**

기업체명	기술이전 분야	착수년도
삼성전자	세탁기 수조 레이저 용접기술	1995
한국중공업	레이저 광섬유 전송기술/광섬유 레이저 연삭기술/원격레이저 가공기술	1995
제일기전	광대역 파장가변 레이저	1993
표준진공	전자총돌형 원자빔 발생장치	1995
서울전광	의료용 급속증기 레이저 기술	1996
급강휴텍	레이저 원격 대기분석 기술	1997

연구는 현재 초기 단계로 하나로 가동 중의 진동을 LDV를 사용하여 측정하여 가능성을 검증하는 실험, 고속카메라와 ESPI 기술을 이용한 온도구배가 있는 물에서의 레이저 파면 왜곡의 정량화 실험, 고출력 연속발진레이저를 사용하는 LDV 개발, 그리고 능동광학계의 구성 및 고속 제어 알고리즘에 대한 연구를 수행 중이다. 본 연구에서 목표로 하고 있는 가동 중인 원자로 내부의 핵연료의 진동감시는 원자로 안전성 향상에 크게 기여할 수 있는 기술로, 원자로 안전성 향상과 국내 원자력 계측기술의 국제경쟁력 제고로 이어질 것을 기대한다.

## 6. 끝 말

한국원자력연구소의 레이저 및 양자광학 연구는 1960년 중반에 국내 최초로 태동하여 1970년대의 일시적인 침체를 거쳐 1980년대 중반부터 다시 중흥기를 맞이하여 현재까지 이어지고 있다. 현재는 박사급 연구원 25명을 비롯하여 전체 40여명의 연구진을 구성하며, 단일 분야로는 국내 최대의 연구인력을 보유하고 있다. 또한 국내의 대학, 연구소, 산업체에서 연구활동 중인 많은 전문가들이 한국원자력연구소를 거쳐간 전역을 가지고 있어 한국원자력연구소는 국내 레이저광학 분야의 원뿌리라 해도 과언이 아니다.

레이저 관련기술은 원자력 분야에서 매우 중요한 핵심기술로서 일본은 2000년대 원자력 4대 기반기술 중의 하나로써 레이저기술을 꼽고 있으며, 한국원자력연구소도 1992년 원자력

**표 2. 한국원자력연구소와 위탁/공동/협동 연구 중인 외국기관**

기관명	연구분야	착수년도
미국 NIST연구소	원자물리이론	1988
러시아 TRINITY연구소	고출력 엑시머레이저 개발 및 원격가공연구	1995
미국 ABB-CE사	레이저 sleeve 용접부 내부식 특성 연구	1995
러시아 분광학연구소	극미량 분석/파장측정기 기술 개발	1994
캐나다 Ontario-hydro사	Sleeve 용접 UT 검사 기술	1995
러시아 쿠르차토프연구소	고출력 전자총 기술	1995
러시아 일반물리연구소	공명 광이온화 분광 기술	1992
중국 SIOFM연구소	레이저빔 투과 특성 연구	1995
일본 ILE연구소	지르코늄 분광학 연구	1995
러시아 PIC연구소	원격대기분석기술	1994
중국 북경대학	자유전자레이저 개발	1997
러시아 대기광학연구소	레이저 대기광학 기술	1997

연구개발 중장기사업이 착수된 이래 이 분야에 대한 적극적인 투자를 아끼지 않고 있다. 현재 한국원자력연구소는 서울대, 고려대, 과기원, 충남대 등을 비롯한 대학과 표준과학연구원을 비롯한 출연연구기관과 십여건의 위탁과제를 수행하고 있으며, 삼성전자, 한국중공업 등(표 1 참조)과의 산·학·연 단체계를 강화하고 있으며, 미국, 러시아, 일본, 중국 등 선진국과의 국제공동/위탁/협동 연구(표 2 참조)를 통해 국제적인 연구수준에 대등하게 접근하고 있다. 1993년부터는 레이저분광학 국제심포지움을 직접 주관하면서 국내외 석학들을 한자리에 모아 이 분야에 대한 국제화에 전력을 기울이고 있다. 또한 최근에는 연구원 창업(김정목 박사-한빛레이저)을 통해 직접 산업현장에 도전하고 있다.

앞으로 한국원자력연구소는 레이저기술을 원자력 산업에 접목시키기 위한 노력을 계속할 것이며, 동시에 레이저광학 기반 기술, 일반산업 응용기술, 레이저기술의 실용화 및 상용화 등에 지속적인 연구투자를 하면서 국내 레이저 광학계를 주도해 나갈 포부를 가지고 있다.