

## 로렌스 리버모어 국립 연구소 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)

김 법 민

의용 기술 연구부(Medical Technology Program, MTP)

kim12@llnl.gov

1952년 9월 미국 국방에 관련된 과학 기술연구를 위해 설립된 로렌스 리버모어 연구소(그림 1)는 뉴멕시코 주에 위치한 로스 알라모스 연구소(Los Alamos National Laboratory, LANL)와 함께 미정부 에너지부(Department of Energy, DOE) 산하의 대표적인 연구소이며 캘리포니아 주립대학(University of California, UC)이 그 운영을 맡고있다. 주요 임무로는 미국 핵무기의 안전한 보관과 성능 유지(Stockpile Stewardship Program), 그리고 핵무기의 확산 방지(Nonproliferation) 등을 들 수 있다.

LLNL은 샌프란시스코 동남쪽 약 40 마일 정도에 위치하고 있으며 지정학적으로 실리콘 벨리, 스탠포드대, 버클리대, UC Davis 등과 가까운 관계로 상호간에 많은 공동연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 정규 직원은 7,300명 정도인데, 그 중 박사가 1,200명 정도이며 학/석사가 1,600명 이상이다. 그 중 한국인은 약 20여명에 이른다.

연간 예산은 약 10억 달러를 상회하고 있으며 지난해 1999년 한해에만 13억 달러의 예산을 집행하였다. 그중 반에 가까운 45%가 Stockpile Stewardship에, 18%가 National Ignition Facility(NIF)를 건설하는데 쓰였으며, 12%가 Nonproliferation에 사용되었다. 나머지 25%는 비슷한 비율로 환경 연구, 생물과 화학 연구, 기초 과학 연구, 그리고 신기술 개발 등에 사용되었다.

50년 가까운 기간동안 세계 최고의 수준의 연구를 진행시켜 온 LLNL의 광기술 연구분야에 대해 단 몇 장으로 소개한다는 것은 무리한 일이지만 수박 겉핥기 식으로나마 1999년 연간 보고서를 기초로 정리 기술해 보도록 하고자 한다. 또한 필자

가 의용 기술 연구부(Medical Technology Program, MTP)에 속해 있는 관계로 MTP에 대한 간략한 소개도 덧붙이고자 한다.

### Stockpile Stewardship Program

LLNL은 원래 미국의 핵무기 개발을 위해 만들어진 기관으로 지금까지 22종의 핵무기 개발에 참여하였다. 세월이 지나며 이미 만들어진 핵탄두의 안전한 보관과 성능 유지가 절실한 문제로 대두되었고 이는 1980년 말까지 Nevada Test Site에서의 지하 핵실험에 의해 유지되어왔다. 그러나 1995년 미국이 포괄적 핵실험 금지(Comprehensive nuclear test ban) 조약을 맺으면서 핵무기의 안전성을 검사하는 새로운 방법이 필요하게 된 바 Stockpile Stewardship Program 이 시작되었다. 이 프로그램은 핵실험을 하지 않고서도 핵무기의 안전성과 성능 검사에 뒷받침이 될만한 자료를 얻을 수 있도록 과학적인 실험들(Radiography와 Hydrodynamic test 등), 기본적인 물리적 자료 측정(예를 들어 각종 물질들의 interaction property, equation of state 등), 그리고 컴퓨터 시뮬레이션 등을 수행한다.

컴퓨터 시뮬레이션을 하는데 필요한 많은 기본적인 자료를 얻기 위해 NOVA나 NIF 같은 초대형 레이저 시설이 생겨났다. 또한 NOVA나 NIF의 정상적인 운영을 위하여 초정밀, 초대형 광 부품 가공기술, Infra-Red, Microwave, x-ray,  $\gamma$ -ray sensor 등의 detector 기술, 그리고 엄청난 에너지의 레이저 빔에도 끄떡없는 광재료 개발등 무수히 많은 분야의 발전을 유도했다. 그리하여 첨단 컴퓨터 장비를 갖추고 핵폭발 당시의 현상을

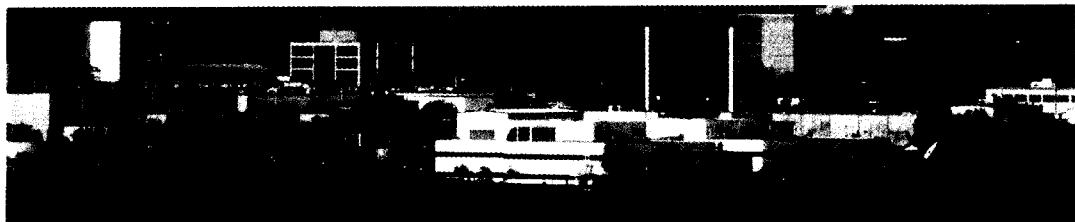


그림 1. 로렌스 리버모어 연구소 전경.

재현해 내기 위해 많은 노력을 해왔고 마침내 1999년 12월에는 사상 최초로 3차원에서의 핵폭발을 컴퓨터로 재현해 냈다.

LLNL의 컴퓨터 시설은 한마디로 대단하다 할 수 있다. 그 한 예로 1999년 10월 IBM사로부터 최첨단 슈퍼 컴퓨터라 할 수 있는 Blue Pacific Supercomputer를 들여왔다. Blue Pacific은 5856개의 프로세서를 가지고 1초당 4조개의 연산을 할 수 있으며(일반 데스크탑 컴퓨터의 15,000배) 2.6조 바이트의 저장 능력을 가지고 있다. 2000년 여름에는 1초당 10조개의 연산능력을 가진 Option White Supercomputer를 들여올 예정이다.

### National Ignition Facility(NIF)

얼마 전까지만 해도 전 세계에서 가장 강력한 레이저로 꼽혔던 NOVA가 1999년 7월을 끝으로 운영을 중단하고 현재는 NOVA보다도 약 60배 더 강력한 NIF를 건설하는데 진력하고 있다(그림 2 참조). NIF는 미 정부에서 국가 핵심 시설로 건설 중인 레이저 시설로 전체 규모만 보더라도 폭 120m, 길이 220m, 그리고 높이 25m로 웬만한 미식 축구장 만한 크기를 자랑한다. NIF는 3개의 서로 연결된 건물들로 이루어져 있으며 그중 광 부품 조립 공장(Optics Assembly Building)은 완공되었고 주 레이저 건물(Laser Building)은 약 95%가 건설되었으며 마지막으로 타겟 연료 건물(Target Area Building)은 2001년 5월 완공 예정이다. 약 30,000m<sup>2</sup>의 부지에 건설 중인 NIF에 총 20억 달러가 소모될 전망이다.

NOVA 레이저의 빔 수가 10개였던 것에 비해 NIF는 192개의 빔 라인으로 구성되어 있으며 최대 파워는 약 500조 watts에 이르고 펄스 에너지는 1.8 MJ, 그리고 펄스 길이는 3-4ns 정도이다. 레이저 빔의 직경은 약 40cm이고 파장은 1,053nm



그림 2. 2000년 봄의 National Ignition Facility(NIF) 건설 현장.

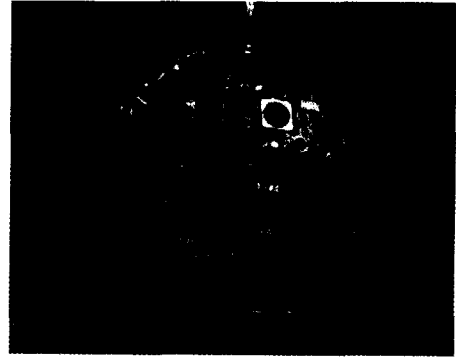


그림 3. 타겟 연료 건물(Target Area Building)으로 이송 중인 10m 직경의 알루미늄 Target Chamber.

이며 여러번의 증폭 과정을 거친 후 타겟 챔버에 도달하기 직전 주파수 변환(Frequency doubling과 tripling)을 통해 가시 영역이나 자외선 영역으로 변환되어 사용된다.

NIF의 주임무는 Inertial Confinement Fusion(ICF) 연구를 통한 stockpile stewardship에 있지만 그 외에도 기초과학 연구나 핵융합을 통한 Fusion Energy를 얻는 방법 그리고 얻어진 에너지의 상업적 이용에도 이용되리라 예상된다.

#### Inertial confinement fusion(ICF)

NIF의 target chamber는 10m 직경의 알루미늄 구(그림 3)로 만들어졌으며 그 중심에 deuterium과 tritium으로 만들어진 핵융합(Fusion)을 일으킬 연료가 놓인다. 연료는 두 개의 층으로 이루어진 작은 구의 모양을 하고있으며 이는 작은 동전 크기의 금으로 만들어진 실린더 안에 놓여진다. 레이저 빔이 금으로 만들어진 실린더의 안쪽 벽을 치게 되며 발생된 x-ray가 타겟 연료를 압축하는 효과를 내어 연료가 충분한 밀도까지 도달하게 되면(납의 20배 정도) 융합이 일어나게 되며 이 과정이 정상적으로 진행되면 레이저 에너지보다 많은 양의 에너지를 방출하게 된다. NIF 레이저가 유일하게 이 현상을 일으킬 것으로 예상된다.

#### 기초과학 연구

현재까지 약 다섯 개 정도의 기초 과학 분야에 NIF가 유용하게 쓰이리라 전망된다. 그 분야는 NIF가 가동하기 시작하면서 더욱 늘어나리라 생각된다. 각 분야는 (1) Astrophysics - inertial confinement fusion(ICF)을 통한 우주 생성 원리 연구에 관련된 연구; (2) Hydrodynamics - NIF는 wind tunnel 이나 shock tubes 보다 훨씬 강력한 shock wave를 만들어 낼 수 있다; (3) Material properties - NIF의 운영으로 극도로 높은

온도와 압력에 대한 연구가 가능해지므로 고 에너지 밀도 연구에 획기적인 전기가 마련될 것이다; (4) Plasma physics - Plasma는 물체의 네 번째 성상으로 우주를 구성하는 주 물질이다; (5) Radiation sources - x-ray나 particle source 에 관한 연구 등이다.

## 초단파길이 펄스 레이저 (Ultrashort Pulse Laser) 개발

초단파길이 펄스 레이저(Ultrashort pulse laser, USPL)는 파장이 짧은 펄스가 아니고 파장은 가시광선 또는 근적외선에 위치하지만 공간상 또는 시간상의 펄스길이가 매우 짧은 레이저를 말한다. LLNL에서 개발된 고에너지 USPL은 파의 길이가 약 1 picosecond 즉  $10^{-12}$ 초 또는 그보다도 짧은 레이저 펄스를 말한다. 파의 길이가 매우 짧기 때문에 intensity는 petawatt (1015W) 단위에 이르며 렌즈로 빛을 집적시킬 경우 엄청난 단위 면적당 빛의 세기를 얻을 수 있다. LLNL의 연구팀은 이 레이저로 반물질(anti-matter)을 만드는데 성공하였고 작은 단위의 핵융합도 성공 시켰다. 현재 이 반응에서 파생되는 중성자의 수를 증가시키는데 집중적인 연구가 행해지고 있으며 성공 시 물질의 결합 조사나 환자의 진단에도 쓰이리라 예측된다 (그림 4 참조).

레이저를 이용한 물질 제거 또는 물질 가공(ablation)은 보통 많은 양의 에너지가 좁은 지역에 밀집되면서 생기는 온도 팽창이나 shock wave를 이용하는 것이 대부분이지만 USPL ablation은 조금 다른 과정을 통해 이루어진다. 이러한 고에너지를 가진 USPL 이 물질과 부딪히게되면 높은 단위 면적당 빛의 세기로 인해 원자나 분자 자체를 깨뜨려서 아주 얇은 표면층 ( $< 1\mu\text{m}$ )에 플라즈마를 생성하게 된다. 이 플라즈마의 흡수 계수가 보통 물질의 흡수계수보다 몇십배로 큰 것이 보통이기

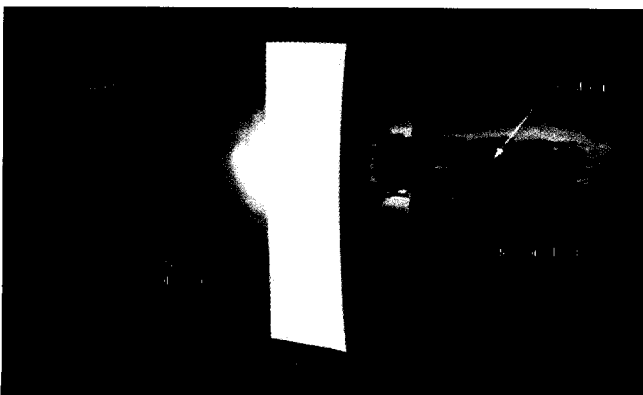


그림 4. Petawatts 레이저가 타겟을 치면서 생성된 전자와 이온 구름.

때문에 일단 플라즈마가 생성되고 난 후에는 빛은 더 이상 물질 속으로 투과하지 못하고 극히 작은 표면 지역에 집적된다. 이 경우 플라즈마의 압력이 빠른 시간내에 극도로 높아져 즉각 레이저가 입사한 반대 방향으로 분출되게 되고 이 과정이 매우 빠른 시간안에 일어나기 때문에 물질 자체로의 에너지 전이가 최소화 된다. 따라서 매우 작은 물질의 양을 제거하며 동시에 주위 부분에 가해지는 충격이 거의 없어 매우 미세한 가공이 가능해진다. 물질 제거율은 펄스당 약 1m 정도로 1kHz 의 발진률을 가진 레이저는 초당 1mm의 깊이까지 가공해 낼 수 있다.

LLNL 에서의 연구 결과로 요즘은 많은 Laser Source 회사에서 작은 크기의 USPL을 생산하고 있고 가격도 초창기 보다 많이 낮아져있다. 필자도 USPL을 이용한 생체 조직 제거나 극 미세수술(microsurgery)을 연구하고 있으며 수술에 필요한 최적의 레이저 요소들을 규명하기 위해 노력 중이다.

## Adaptive Optics

지구의 대기권 때문에 아무리 크고 성능이 좋은 망원경을 쓰더라도 지상에서 찍는 천체사진은 흐려지기 마련이고 이를 피하기 위하여 허블 망원경이 대기권 밖으로 쏘아 올려졌다던 것은 주지의 사실이다. 최근 LLNL에서는 이 영상의 흐려짐을 방지할 수 있는 Adaptive Optics System을 개발해 내었고 이 시스템은 하와이에 있는 Keck Telescope(직경 10m)에 장착되어 약 2년 전부터 가동되었다. 이 시스템을 이용해 1999년에는 허블 망원경보다 나은 선명도로 천왕성과 타이탄(토성의 달)의 표면 사진을 찍는데 성공하였다.

## MTP의 의료용 레이저 기술 개발

필자가 속해 있는 의료용 기술 개발부(Medical Technology Program)는 1994년에 설립되었으며 현재 레이저 프로그램에 소속되어 있다. 설립 목적은 LLNL에서 다년간 쌓여진 Technology, 특히 레이저 기술을 의료용 목적에 이용하는데 있다. 의학에서의 레이저의 이용은 크게 치료용과 진단용으로 나뉘는데 30명 정도의 과학자들이 양쪽 분야에서 연구에 정진하고 있다. 20여 가지의 진행중인 프로젝트 중에서 특기할 만한 몇 가지에 대하여 간단히 기술해 보기로 하겠다.

### 레이저를 이용한 뇌일혈 (stroke) 치료

뇌일혈은 미국에서 만도 1년에 50만명에 달하는 사람들이 겪게되는 치명적인 병으로 그중 약 80%가 carotid artery(뇌에

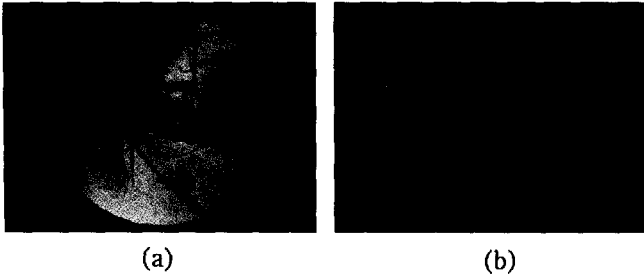


그림 5. MTP에서 개발한 Opto-acoustic 기술로(막혔던) Femoral artery가 재생된 모습을 보여주는 Angiogram, (a) 치료 전, (b) 치료 후.

피와 산소를 전달하는 동맥)가 혈전에 의해 막혀 생기는 ischemic stroke 이다. stroke 환자가 발생했을 때 생기는 문제는 어떤 치료방법이던지 뇌에 영구적인 손상이 가기 전에 빠른 시간 내에 행해져야 한다는데 있다. MTP에서 개발한 기술은 1 - 10nm 정도의 파길이를 갖는 레이저 펄스를 optical fiber로 전달하여 fiber의 끝단에서 shock wave를 일으켜 혈전을 잘게 부수는 것이다. 이 경우 레이저 에너지가 혈전에 직접 흡수되는 것이 아니라 shock wave를 이용해 파괴하기 때문에 혈전 덩어리를 적혈구(직경 10m) 정도의 크기로 잘게 부수는 데 유리하다. 혈전을 파괴하더라도 그 파편이 크면 어딘가 다른 지역에서 또 다시 혈관을 막을 수 있기 때문이다. 이 기술은 민간 회사(Endovasix Inc.)에 기술 이전이 된 상태이다. 그림 5 참조.

### Optical coherence tomography (OCT)

OCT는 비교적 최근에 개발된 기술로 고 해상도의 생체 조직 imaging 기법으로 각광 받고 있다. 원리는 마이켈슨 간섭기(Michelson interferometer)와 동일하며 다른 점은 빛이 single mode fiber 로 전달된다는데 있다(그림 6). 약 1.3m의 파장을 갖는 빛이 반으로 나뉘어 그 한쪽은 일정 속도로 반복 운동을

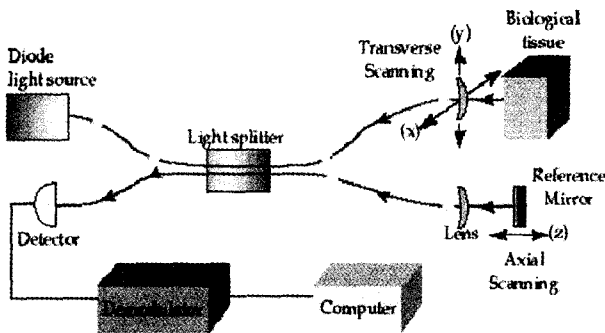


그림 6. Optical Coherence Tomography(OCT)의 기본 구조. Reference mirror가 왕복 운동을 하면서 생체 조직 각 깊이에서의 산란계수가 얻어진다.

하는 reference mirror에, 또 한쪽은 imaging 하고자 하는 생체 조직에 전달된다. 조직이나 mirror에서 산란된 빛의 일부는 다시 같은 fiber에 의해 모아지고 양 빛의 이동 거리가 같을 때 간섭 현상을 일으키게 되어 그 간섭 현상의 고저에 따라 생체 조직의 산란계수가 결정된다. 몸 속의 많은 구성 성분들은 조금씩 다른 산란계수를 가지며 특히 기관들과의 경계에서는 많은 산란이 일어나게 되므로 이에 따라 내부 구조를 파악할 수 있게 된다. MTP 에서는 NIH(National Institute of Health)로부터 연구비 지원을 받아 충치나 풍치의 진단에 쓰일 수 있는 작은 OCT기술을 개발, 현재 임상 실험중이다.

### Higher harmonic generation을 이용한 미세 조직 Imaging

NOVA나 NIF 모두 근적외선의 파장을 가진 레이저 빔이 target chamber에 도달하기 직전 2nd 또는 3rd harmonic으로 변환되어 사용된다. 고효율의 higher harmonic conversion을 일으키기 위하여 레이저 빔 크기에 맞는 비선형 결정(nonlinear crystal)에 대한 연구는 LLNL의 특기사항중 하나라 할 정도로 활발한데 이와 비슷한 현상이 신체조직에서도 일어난다. 특히 비선형 광학 특성이 존재하는 조직 성분인 collagen이(조직을 손상시키지 않는 정도의)강한 세기의 레이저광 과 만나면 2nd harmonic conversion이 일어나고 collagen 조직의 변형에 따라 이 현상도 영향을 받게 된다. 이러한 성질을 이용하여 imaging 을 하려는 프로젝트가 NIH의 지원 하에 진행중이다. collagen 조직에 영향을 주는 원인으로는 피부암, 당뇨병 등이 있다.

이외에도 MTP에서는 편광을 이용한 유방암 imaging, 형광(fluorescence)를 이용한 당뇨 진단, Near-field scanning microscopy (NSOM)을 이용한 single molecule imaging 등의 연구가 연구소 내부 혹은 외부의 지원을 받아 진행 중이다.

### 그 밖의 연구들

국가 안전에 관련된 일 외에 환경이나 순수 생물학 등에도 많은 연구가 진행중이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 기상 예측이나 핵폐기물의 처리에 이용될 물질을 개발하는데 에도 많은 노력을 경주하고 있다. Biology and Biotechnology Research Program(BBRP) 에서는 로렌스 버클리 그리고 로스 알라모스 연구소와 합작으로 Joint Genome Institute(JGI)을 구성하여 올해에(2000년) 인간 genome을 해독하는데 성공했으며 단백질의 구조 규명, 생물학전을 대비한 해독제 연구, 흡연으로 인한 영향에 대한 연구 등 공공 위생에 관련되는 연구도 진행 중이다.

이밖에도 셀 수 없을 정도의 다양한 연구들이 진행 중인데 LLNL에는 core project 이외에도 공정한 심사를 거쳐 연구원들의 창의적이고 독창적인 연구를 지원하는 프로그램을 가지고 있다. 이 프로그램을 Laboratory Directed Research and Development(LDRD)라 부르며 그중 가장 작은 단위의 연구비가 주어지는 Lab-Wide(LW, 연간 20만 달러 정도) 부문에서는 정규 연구원 외에 PostDoc 도 주 연구자가 될 수 있도록 배려하고 있다.

## 맺음말

지금까지 LLNL의 역사, 대표적인 프로젝트들 그리고 MTP의 의용 레이저 연구에 대해 간략히 알아보았다. LLNL에서는 미국 국가 기밀에 관련되는 많은 연구뿐만 아니라 다방면의 기초 또는 응용 연구가 진행되고 있으며 최고의 시설을 갖춘 첨단 연구의 본산이라는 점에서 젊은 한국 과학도들이 자부심을 가지고 일할 만한 곳이라 생각된다.