

## 1. 서론

펨토초 레이저는 펄스폭이 펨토초 영역이고, 순간출력이 매우 높은 특성을 갖고 있다. 90년대 이후, 펨토초 레이저의 급속한 발전으로 인하여, 펨토초 시간영역에서 일어나는 다양한 극초단 현상에 대한 연구활동이 매우 활발해졌다. 또한, 펨토초 레이저의 매우 높은 순간출력 특성을 이용하여, 초고속 비선형 현상에 대한 연구도 가능하게 되었다.

일반적으로 펨토초 레이저의 발전기로부터 발생되어 나오는 광펄스는 수백 kW의 순간출력을 갖는다. 펨토초 광펄스의 세기를 증강하는 방법으로 CPA(Chirped Pulse Amplification) 방법을 사용하는데<sup>[1]</sup>, 현재 CPA방법의 증폭단을 순차적으로 구성하면 광펄스의 출력을 Petawatt까지

초단 초고출력 펄스 레이저 시설의 필요성도 점점 커지고 있다.

국내의 펨토초 과학·기술 연구와 초고강도 전자기장하에서의 물리·화학적 현상 연구에 필요한 고출력 광원을 마련하기 위해, 펨토초 시간영역의 극초단 초고강도 펄스레이저 공동연구시설 구축사업이 추진될 예정이다.

광주과학기술원 (부설)고등광기술연구소는 과학기술부의 지원을 받아 2003년도부터 연구기반구축사업의 일환으로 "차세대 극초단 광양자빔 연구시설(가칭)"을 구축할 계획이다.

펨토과학 특집 지면을 빌어, 각국의 연구현황과 본 연구소에서 구축할 예정인 극초단 광양자빔 연구시설의 추진계획을 간략히 소개한다.

## 특집 ─ 펨토 과학 ─

# 고등광기술연구소 차세대 극초단 광양자빔 연구시설 구축 추진 현황

이종민\*

증폭할 수 있다.

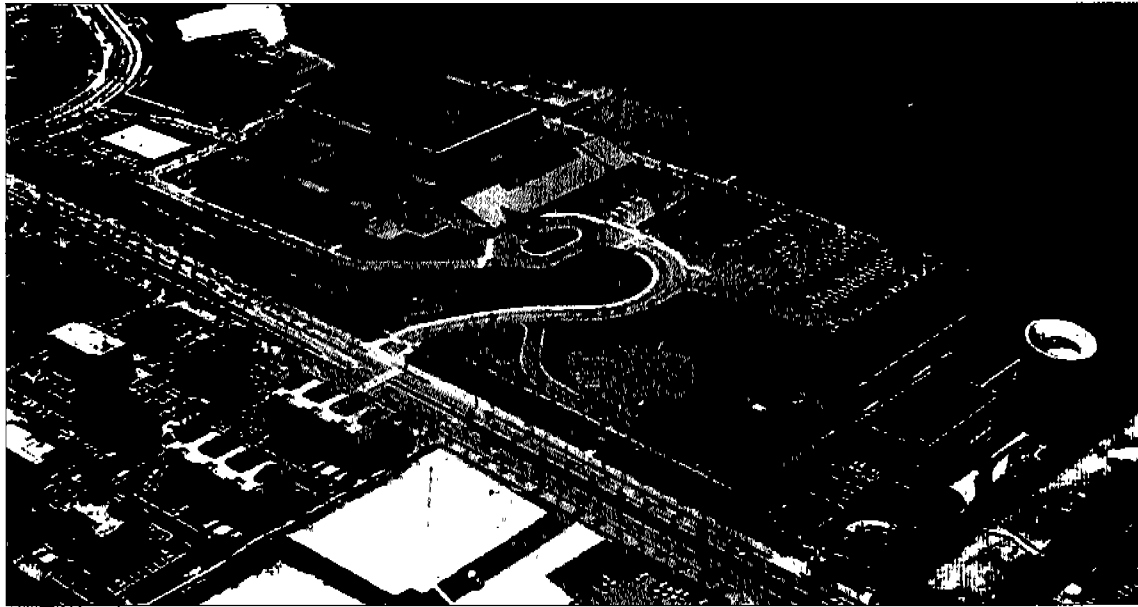
이러한 초고출력의 극초단 광펄스를 매질에 집속하면, 기존에는 불가능하였던 초고강도 전자기장하에서의 새로운 물리화학적 현상에 대한 연구를 할 수 있다. 일본, 미국, 영국 등에서는 몇 년 전부터 극초단 초고강도 펄스 레이저 연구시설을 설치하여, 초고강도 전자기장 물리, 펨토화학, 생물학 등의 분야에서 다양한 연구를 수행하고 있다.

국내에서도 몇몇 연구그룹들이 극초단 펄스의 발생에 대한 연구를 하고 있으며, 극초단 펄스레이저의 증폭에 대한 연구도 수 TW 수준까지 진행 중에 있다<sup>[2]</sup>. 또한, 이러한 펨토초 레이저를 이용하여 매우 다양한 분야의 응용연구들을 수행하고 있다. 국내의 펨토초 과학·기술에 대한 응용연구가 활발해짐에 따라, 응용연구의 광원으로 사용되는 극

## 2. 극초단 초고출력 레이저 시설을 이용한 펨토초 과학기술의 각국 연구현황

80년대 중반까지 색소 또는 엑시머가 CPA방법을 이용한 극초단 초고강도 레이저의 이득매질로 사용되었다. 그러나 이들 매질은 낮은 포화에너지로 인해서 증폭율이 제한을 받게 된다. 이를 해결하기 위해 고체 이득 매질이 대체 사용되었다. 극초단 펄스 증폭에 사용되는 고체 이득 매질인 Nd:glass, Ti:sapphire, Alexandrite 등은 색소매질에 비해 100배 정도 큰 포화에너지를 갖고 있다. 고체 이득 매질을 이용한 극초단 초고강도 레이저 개발의 초기에는 Nd:glass<sup>[3]</sup>가 주로 이용되었고, 이후 Alexandrite<sup>[4]</sup>, Ti:sapphire<sup>[5-6]</sup>등이 이용되고 있다.

\* 광주과학기술원 고등광기술연구소



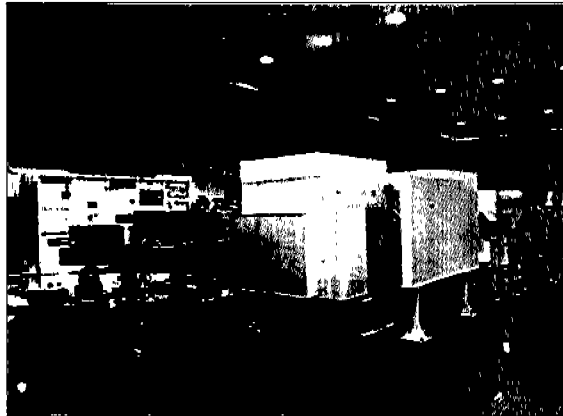
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

그림 1. 일본 광양자과학연구센터

(a) 전경, (b) Table-top Terawatt 레이저, (c) 500 TW 레이저, (d) 레이저 가속기, (e) X선 레이저

## 고등광기술연구소 차세대 극초단 광양자빔 연구시설 구축 추진 현황

Nd:glass를 이용한 초고강도 레이저는 고에너지가 필요한 실험에 사용되고 있다. Nd<sup>3+</sup> 이온을 이용하는 Nd:glass, Nd:YAG 등의 고체 이득 매질은 이득 선폭의 제한으로 인해 100 fs 이하의 극초단 펄스의 생성 및 증폭에는 적합하지 않다. 그래서, 미국의 로렌스리버모어연구소(LLNL)와 일본 오사카대학의 Institute of Laser Engineering(ILE)에서는 나노초 및 피코초 펄스 영역의 페타와트급 Nd:glass 레이저로 핵융합실험을 수행하고 있다.

Ti:sapphire 매질은 극초단 펄스 증폭에 필요한 매우 넓은 이득 선폭을 갖는다. 그러나 Nd:glass에 비해 상대적으로 낮은 포화에너지로 인해 여기광의 에너지를 저장하는 에너지 축적용량이 작다. 또한, 형광수명(3  $\mu$ s)이 짧아서 램프에 의한 광펌핑이 어렵다. 이와 같은 단점으로 인해, Ti:sapphire는 에너지 증폭의 측면에서는 Nd:glass에 비해 불리하지만, 700~1100 nm에 이르는 매우 넓은 이득 선폭 때문에 30 fs 이하의 극초단 펄스의 증폭까지도 가능하게 한다. 이러한 극초단 펄스의 증폭이 가능함에 따라, 순간출력 증폭의 경우에는 Ti:sapphire가 Nd:glass에 비해 유리하다. 따라서, 본 연구시설은 극초단 초고강도 펄스를 생성시켜야 하기 때문에 발진기와 증폭기의 이득매질을 Ti:sapphire로 선정하였다.

Ti:sapphire를 이용한 극초단 초고강도 레이저로서 현재까지 가장 높은 출력을 달성한 것은 일본원자력연구소(JAERI)산하의 광양자과학연구센터(APRC)에서 개발한 850 TW급 시설이며, 2002년도부터 운용중에 있다. 그림 1은 이 연구센터의 연구시설과 실험장치들을 보여주고 있다. 이 연구센터에서는 초고강도의 레이저빔을 매질에 집속시켜 빛과 매질과의 상호작용을 규명하는 연구, 이때 발생하는 X선을 이용한 X선 레이저에 대한 연구, 레이저를 이용한 전자가속기 연구, 암치료등 의료분야 응용을 위한 양성자 가속기 연구, X선 현미경에 대한 연구 등을 진행하고 있다.

미국 미시간 대학의 CUOS(Center for Ultrafast Optical

Science)에서는 극초단 레이저 개발과 이를 이용한 다양한 응용실험들을 수행하고 있다. 이 연구센터에는 40 TW 출력의 Ti:sapphire 레이저가 가동중이고, 현재 100 TW로 출력을 증강하고 있다. 이 외에도 다양한 저출력 극초단 펄스레이저를 보유하고 있다. 이 연구센터에서는 극초단 펄스 레이저 시스템 개발 분야의 연구가 매우 활성화 되어 있다. 또한, 레이저 시스템 개발과 함께 이를 이용한 응용연구도 매우 활발하게 이루어지고 있다. 응용연구 그룹에서는 탁상형 이온가속기, 극초단 레이저를 이용한 증착, 의료용 극초단 레이저, Tera-Hz, 나노광학 등의 다양한 분야의 연구를 수행하고 있다.

미국의 LLNL에서는 페타와트 Nd:glass 레이저를 이용한 핵융합연구뿐만 아니라, Ti:sapphire를 이용한 다양한 고출력 레이저 장치를 구성하여 연구를 수행하고 있다. 현재 200 TW의 Ti:sapphire 레이저가 운용중이고, 이를 이용하여 고온, 고압 플라즈마에 대한 연구가 진행중이다.

영국의 러더포드애플톤연구소(RAL)에서는 100 TW 출력의 Nd:glass 레이저와 4 TW 출력의 Ti:sapphire 레이저를 이용하여 레이저 플라즈마 및 X선 레이저 빔 발생 연구와 더불어 화학, 생물학 분야에서도 다양한 응용연구를 수행하고 있다. 이 연구소는 현재 Nd:glass 레이저의 출력을 Petawatt급으로 높이는 작업을 진행중이다.

프랑스의 Laboratoire d'Optique Appliquée(LOA)에서는 100 TW 출력을 갖는 Ti:Sapphire레이저 및 다양한 펨토초 레이저를 이용하여 레이저와 물질의 상호작용, 플라즈마 연구, X선 발생 연구, 펨토 화학, 비선형 광학, 고체 물리 등 다양한 분야의 연구를 하고 있다. 또한, 레이저 출력을 1 PW로 증강하는 작업을 높이기 위한 연구를 수행하고 있다. 그림 2는 LOA의 100TW 레이저 시스템을 나타낸다.

표 1은 현재 선진국 가동하고 있는 대표적인 극초단 초고강도 레이저 시설들을 나타낸다. 이 외에도 다양한 출력과

표 1. 현재 가동중인 대표적 극초단 초고강도 레이저 시설

시설	출력	매질	펄스폭	펄스에너지
JAERI(일본)	850 TW	Ti:Sapphire	33 fs	17 J
LLNL(미국)	200 TW	Ti:Sapphire	75 fs	15 J
LOA(프랑스)	100 TW	Ti:Sapphire	25 fs	2.5 J
RAL(영국)	100 TW	Nd:glass	800 fs	80 J
MBI(독일)	100 TW	Ti:Sapphire	50 fs	5 J
CUOS(미국)	40 TW	Ti:Sapphire	24 fs	1 J

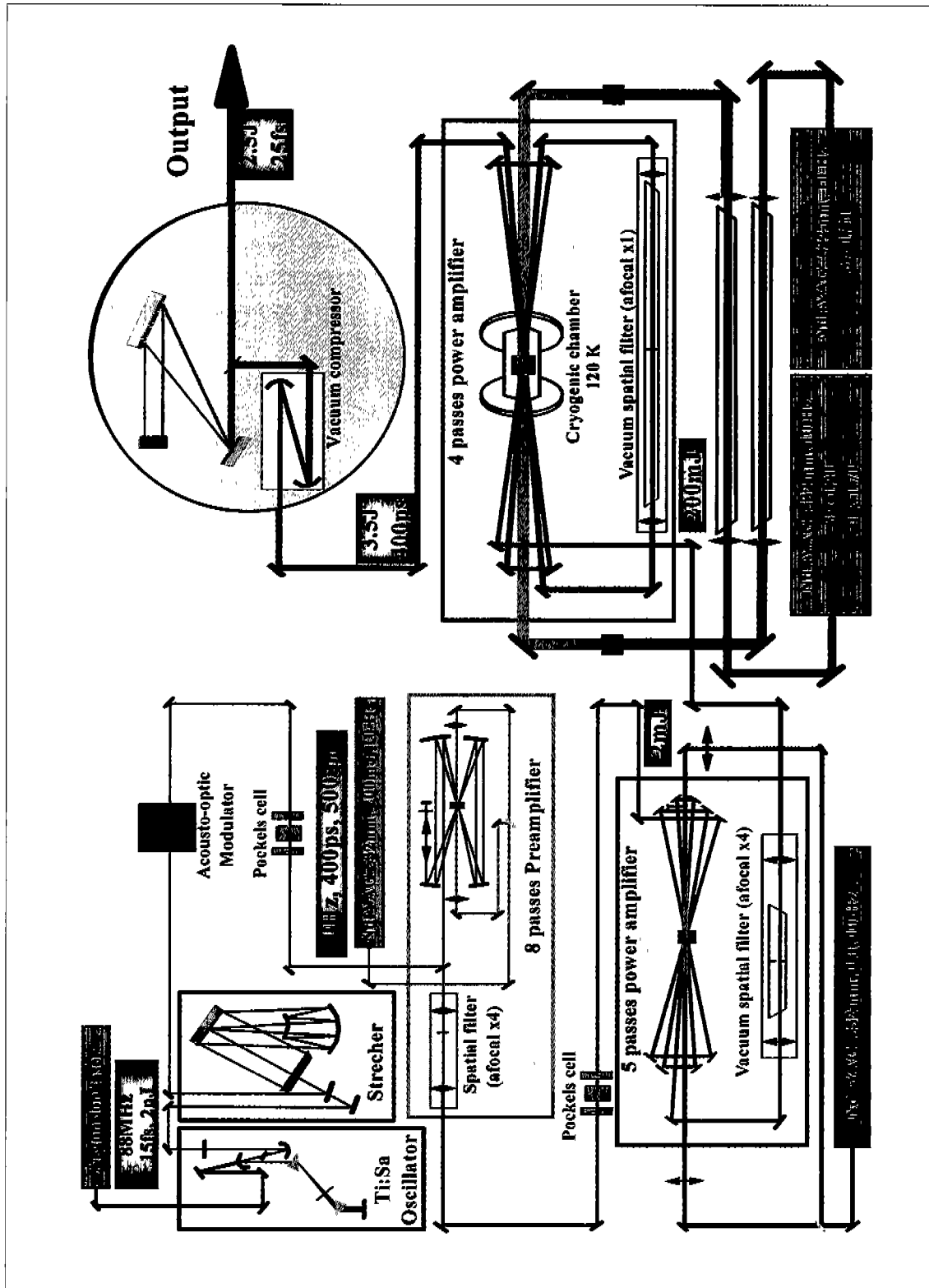


그림 2. 프랑스 LOA의 100 TW Ti:Sapphire 레이저 시스템 Optical Layout

## 고등광기술연구소 차세대 극초단 광양자빔 연구시설 구축 추진 현황

펄스폭을 갖는 극초단 초고강도 레이저가 세계 각국에서 가동되고 있다.

### 3. 국내 시설 구축 개요

고등광기술연구소에 구축할 “차세대 극초단 광양자빔 연구시설”의 최종 출력특성은 펄스폭 30 fs, 출력 500 TW 이상을 목표로 하고 있다. 연구시설은 초고강도 레이저 장치 및 부대시설과 응용실험실을 합하여 약 1,500평 규모로 구축될 것이다. 연구시설 설치에 소요되는 총 사업기간은 2003년부터 2008년까지 6년으로 예정하고 있다. 또한, 이 연구시설 구축을 위한 총 사업비는 480 억원이 소요될 것으로 예상된다. 연구시설의 구축을 위해 극초단 펄스레이저 전문가와 사용자들로 구성된 추진위원회를 구성하여 세부적인 레이저 및 응용 장비들의 사양과 수량을 결정할 것이다.

연구시설은 출력규모에 따라 저출력, 중간출력, 고출력 레이저로 구성되는 레이저 시설과 이용자 실험실 및 연구원을 위한 연구실로 구성된다. 고출력을 필요로 하지 않는 생명과학, 초고속분광학 등의 연구를 위해, 저출력 및 중간출력의 레이저 장치를 고출력과 구분하여 설치한다. 이러한 응용연구에 필요한 저출력 및 중간출력 레이저 장치는 사용빈도가 매우 높다. 따라서, 높은 사용빈도를 충족시키기 위하여 저출력급 레이저 장치는 출력특성(첨두출력, 펄스폭, 반복률, 파장등)에 따라 별도로 여러기를 설치할 예정이다.

#### 3.1 저출력 레이저 장치

저출력 레이저 장치(1 TW 이하)는 펄스폭(20~100 fs), 펄스당 에너지(nJ~mJ), 반복률(10 Hz, 1 kHz, 80 MHz 등), 파장 등에 따라 다양한 레이저 시스템들로 구축된다. 또한, 이 레이저 장치를 이용한 응용실험을 위해 별도의 응용실험실이 구축될 것이다. 이 실험실은 저출력으로 가능하고, 고반복률이 필요한 재료 가공, 나노광학, 생체광학, 초고속 분광학, 비선형 광학 등의 응용연구를 위한 것이다.

#### 3.2 중간출력 레이저 장치

중간출력 레이저 장치(1~10 TW)는 펄스폭 50 fs 이하, 펄스에너지 100 mJ정도, 반복률은 10 Hz정도 사양의 레

이저 장치로 구축된다. 중간출력 레이저 장치를 이용한 실험실에서는 X-선 발생, 고차 조화파, 초고속 비선형 현상, 레이저 플라즈마 연구 등 상대적으로 중간출력이면서 저반복률로 가능한 실험들을 수행할 수 있을 것이다.

#### 3.3 고출력 레이저 장치

고출력 레이저 장치(500 TW 이상 확장 증폭단)의 경우에는 안정화된 발진 장치와 전치증폭기를 거쳐 다단증폭을 하게 되며, 점점 증폭단을 추가하여 출력을 증가시키는 방식으로 구축할 것이다. 따라서, 증폭단별로 20 TW, 100 TW, 500 TW 등의 출력확대가 가능하며, 이용자들은 응용 실험에 필요한 출력세기에 따라 각각 필요한 출력을 이용할 수 있을 것이다. 이 고출력 확장 증폭단을 이용하여 레이저 가속기, X-선 레이저, 고강도 레이저와 전자빔의 상호작용 등 고출력이 필요한 응용연구를 수행할 수 있을 것이다.

#### 3.4 부대 장치 및 시설

레이저와 매질의 상호작용을 연구하기 위한 반응챔버 등의 공통적인 실험장치들은 레이저와 함께 설치하고, 펄스진단 및 측정을 위한 기본적인 장비들도 응용실험실에 구축할 것이다. 또한, 연구원들을 위한 연구실도 구축할 예정이다. 현재 응용실험실과 연구실은 각각 15평, 7.5평 정도의 규모로 15실과 20실을 계획하고 있다. 방문연구자를 위해 별도의 방문자 숙소도 구축할 것이다.

## 4. 국내 시설 구축 일정

### 4.1 1차년도(2003년) : 발진장치 및 전치증폭장치 완성 및 20 TW 시스템 구축

시설 구축사업의 첫해인 2003년에는 극초단 펄스 발생장치와 전치증폭기를 완성하고, 20 TW 출력의 증폭장치를 구축할 예정이다. 이를 위한 저출력 펄스 발생장치(펄스폭 20 fs, 에너지 2 nJ, 반복률 80 MHz)는 이미 구축되어 있다.

또한 저출력 및 중간출력 레이저가 각각 1기씩 추가로 구축될 것이다. 1차년도에 구축될 레이저장치의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 1차년도(2003년)에 구축예정인 레이저 장치의 사양

구분	저출력	중간출력	고출력 확장 증폭단
펄스폭	100 fs 이하	50 fs	30 fs
순간 출력	10 GW	< 1 TW	20 TW
펄스에너지	1 mJ	< 50 mJ	600 mJ
동작 반복율	1 kHz	10 Hz	10 Hz
중심파장	800 nm	800 nm	800 nm

#### 4.2 2차년도(2004년) : 100 TW 증폭단 개발 및 파장변환장치 구축

2차년도인 2004년에는 100 TW급 증폭단 구축에 착수할 것이다. 또한 저출력 및 중간출력 레이저를 각각 1기씩 추가로 구축하고, 다양한 파장 발생을 위해 조화파 발생기와 광매개증폭기(optical parametric amplifier)도 구축할 예정이다. 100 TW 증폭단의 사양은 다음과 같다.

- 펄스폭 : 30 fs
- 순간 출력 : 100 TW
- 펄스 에너지 : 3 J
- 동작 반복율 : 10 Hz
- 중심 파장 : 800 nm

#### 4.3 3~4차년도(2005~2006년) : 100 TW급 증폭단 구축 완료 및 연구동 건물 완성

연구시설 구축의 2단계인 3, 4차년도에는 레이저시설과 응용연구를 위한 건물이 완성될 것이며, 100 TW 급의 증폭단을 완성할 예정이다. 연구동이 완성됨에 따라 기존의 연구실에 설치되어 있던 레이저 시설을 새로운 연구동으로 이전하여 설치하고, 반응챔버 등의 부대장치와 응용실험실의 부대장비 구축을 완료할 것이다. 또한 500 TW급의 증폭단을 구축을 시작할 것이다.

#### 4.4 5~6차년도(2007~2008년) : 500 TW급 증폭단 구축

연구시설 구축의 3단계인 5,6차년도에는 500 TW 급의 증폭단을 완성하여, 안정화 단계를 거쳐 모든 시설의 구축을 완료할 예정이다. 500 TW 급의 증폭단의 구축후의 출력 등 사양은 다음과 같다.

- 펄스폭 : 30 fs
- 순간 출력 : 500 TW이상
- 펄스 에너지 : 15 J
- 동작 반복율 : 2 pulses/hour
- 중심 파장 : 800 nm

### 5. 연구시설의 응용 및 이용

#### 5.1 응용분야

연구시설의 극초단 광펄스의 특성은 출력광이 극초단 펄스이고, 그 세기가 매우 크다는 것이다. 따라서, 이와 같은 특성을 이용하여, 아래와 같은 펨토평학 분야(Femto physics, Femto chemistry, Femto biology 등)의 다양한 응용연구를 수행할 수 있다.

- |                |                |
|----------------|----------------|
| - 비선형 광학       | - 시분해 분광학      |
| - 펨토 화학        | - 레이저 ablation |
| - 결맞은 X-발생     | - 고차 조화파       |
| - 초고속 광전소자     | - 정밀 생체 영상     |
| - 반도체에서 초고속 현상 | - 중성자 발생       |
| - 레이저 가속기      | - 초강력장 과학      |
| - 상대론적 현상 연구   | - 주파수 및 시간 표준  |
| - 초정밀 가공       | - 초고속 생체 반응    |
| - 이온빔 발생       | - 광펄스와 매질 반응   |
| - 플라즈마 연구      | - 핵물리학         |
| - 기타           |                |

#### 5.2 연구시설 이용

“차세대 극초단 광양자빔 연구시설”은 국가 이용자 시설(National User Facility)로서, 필요로 하는 연구자는 누구

## 고등광기술연구소 차세대 극초단 광양자빔 연구시설 구축 추진 현황

나 이용할 수 있도록 개방시설 형태로 운영될 것이다.

구축일정에 따라, 저출력 시설은 2003년 하반기 또는 2004년 초반부터 이용할 수 있을 것이다. 20 TW 레이저는 2004년 상반기에 구축이 완료되면 2004년 하반기부터 사용이 가능할 것이다. 100 TW급 레이저는 2006년 하반기부터 이용자들이 사용할 수 있게 할 예정이다. 시설구축이 완료되는 2008년 이후에는 고출력급까지 모든 시설을 원활히 이용할 수 있게 될 것이다.

본 연구시설을 이용하여 각각의 응용실험들을 수행하기 위해 필요한 계측장비 등의 부대장비들은 기본적인 장비의 경우 연구시설에서 제공되지만, 각 실험에 특화된 장비들은 각 응용실험을 수행하는 연구자들이 준비하게 된다. 기본적인 부대장비들은 사용자들의 의견을 반영하여 연구시설 설치와 함께 구비하고, 연구시설 구축후에도 계속적으로 추가 보완해 나갈 것이다.

장기간 연구를 수행하는 방문자들에 대한 지원을 위해 방문자 숙소도 마련하여 운영할 것이다.

### 6. 맺음말

초고강도 극초단 펄스 레이저 시설을 국내에 설치함으로써, 관련분야 연구가 활성화 될 것으로 기대된다.

또한, 극초단 광양자빔을 이용한 중성자빔, 양성자빔, X선, THz 등의 새로운 선원(Source)을 개발함으로써, 응용 연구분야를 더욱 확장시켜 나갈 예정이다.

연구시설의 성공적인 설치를 위한 의견수렴에 국내연구자들의 적극적인 참여를 바란다. 또한, 국내의 다양한 분야에서 관련연구를 수행하는 연구자들의 많은 이용 및 활용을 기대한다.

### 참고문헌

- (1) D. Strickland, G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- (2) Y. H. Cha, Y. I. Kang, C. H. Nam, J. Opt. Soc. Am. B16, 1220 (1999).
- (3) P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Morou, IEEE J. Quantum Electron. 24, 398 (1988).
- (4) M. D. Perry, F. G. Patterson, J. Weston, Opt. Lett. 15, 381 (1990).
- (5) G. Vaillancourt, T. B. Norris, J. S. Coe, P. Bado G. A. Mourou, Opt. Lett. 15, 317 (1990).
- (6) K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka, T. Kase, Y. Akahane, H. Takuma, Opt. Lett. 23, 1468 (1998).
- (7) B. C. Walker et al., Opt. Express 5, 196 (1999).
- (8) M. Pitman, S. Ferre, J. P. Rousseau, L. Notebaert, J. P. Chambaret, G. Cheriaux, Appl. Phys. B74, 529 (2002).

### 약 력



이종민(李 鍾 旻)

현재근무처 · 광주과학기술원 고등광기술연구소장 및 신소재 공학과 교수로 재직중

최종학력

1980. 9. 27 고려대 물리학과 박사

1970. 2. 26 서울대 물리학과 석사

1966. 2. 26 서울대 물리학과 학사

주요경력

1973 ~ 1986 국방과학연구소 전자광학부 실장

1986 ~ 2001 한국원자력연구소 미래원자력기술개발단 단장

2000 ~ 2001 한국 광학회 회장

2001 ~ 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소장, 신소재 공학과 교수

주요관심분야:

레이저분광학, 레이저광학, 극초단 초고출력 레이저, 입체영상

E-mail:leejm@kjst.ac.kr