



I. 서론

레이저가 개발된 이래 40여년동안 레이저의 출력을 증대시키는 연구가 지속되어 왔다. 그중에서도 1974년에 포화 흡수 및 이득을 이용한 모드잠금(mode-locking) 기술이 Ippen 등에 의하여 개발되어 펄초초의 레이저 광을 얻을 수 있게 되었다.^[1] 그 이후 1985년과 1991년에 G. Mourou와 D.E. Spence에 의하여 각각 Chirped Pulse Amplification (CPA) 기술과^[2] Kerr Lens Mode-locking (KLM)기술이^[3] 개발되어 펄초초영역의 소형의 극초단 레이저는 그 출력이 Terawatt(10^{12} W)급으로 증가되었다. 이러한 테라와트급의 레이저 광을 집중시키면 어렵지 않게 $10^{18} - 10^{21}$ W/cm²의 초고출력을 얻을 수 있으며 이를 이용한 고휘도 x-선원, 전자 및 양성자 가속, 중성자 전원 개발 등 새로운 빛-물질

이러한 고에너지의 입자 및 광자의 생산은 고밀도로 집중된 에너지가 아주 작은 부피의 매질에 가해짐으로써 이루어진다. 레이저 광 에너지는 첫 번째로 전자에 전달되며 이차 과정을 통하여 양성자 및 이온에 전달되게 된다. 또한 전자는 x-선이나 감마선을 방출하기도 하며 이는 다시 중성자 발생을 유도시키게 된다. 본 논문에서는 레이저 출력에 따른 물리현상과 초고출력 레이저를 이용한 양성자, 중성자 발생 원리 및 세계적 연구동향을 소개하며 이러한 입자들의 응용분야에 대하여 기술하고자 한다.

II. 기본 원리

CPA 기술을 이용한 레이저 시스템의 경우 우리가 얻을

특집 ■ 펄초 과학 I

초고출력 레이저를 이용한 양성자/중성자 발생기술

고도경*, 이기태, 유병덕, 김철중**

상호작용 연구를 전세계적으로 많은 연구실에서 수행되기 시작하였다. 이전까지만 하더라도 이러한 연구는 레이저 핵융합을 목표로 건설된 아주 거대한 시설에서 이루어져 왔다. 몇가지 대표적인 연구시설을 예로 들면 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), Los Alamos National Laboratory(LANL), Naval Research Laboratory(NRL), 영국의 Rutherford Appleton Laboratory(RAL), 프랑스의 CEA-Limeil, 독일의 Max Born Institute, 일본의 Institute of Laser Engineering (ILE) 등이며 미국의 LLNL에서는 1.5 petawatt의 출력을 기록하였다. 그러나 현재에는 전세계적으로 수많은 대학과 연구소에서 CPA 기술을 이용한 소형의 레이저 시설을 이용한 많은 연구가 진행되고 있으며 일본의 원자력연구소의 경우 2002년에 Ti:sapphire 레이저를 이용하여 500TW의 출력을 달성하였다.

수 있는 출력의 최대치는 확대된 펄스(stretched pulse)의 손상문턱세기 F_0 과 증폭기의 포화강도(fluence) F_{sat} ($=h\nu/\sigma$)에 의하여 제한받게 된다. 여기서 h 는 플랑크 상수이고, ν 는 레이저 주파수, σ 는 레이저 발진 주파수에서의 전이단면적이다. 1나노초 정도 확대된 펄스의 경우에 Ti:sapphire 결정의 경우 F_0 는 약 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 이며 F_{sat} 는 $1\text{J}/\text{cm}^2$ 이다 (Yb:glass의 경우 $F_{sat} = 40\text{J}/\text{cm}^2$). 하이젠베르크의 불확정성의 원리 $\Delta\nu_a \cdot T = 1/\pi$ 를 이용하면 가능한 단위면적당 최대 출력은 다음식으로 주어진다.

$$P_{th} = \pi \frac{h\nu}{\sigma} \Delta\nu_a \quad (1)$$

여기서 $\Delta\nu_a$ 는 균질선폭확대된 전이선폭이다. 레이저 광을 최대한로 집중할 수 있는 크기가 레이저 파장에 해당된다고 볼 때, 최대 집중가능한 출력강도는 다음식

* 광주과학기술원 고등광기술연구소
** 한국원자력연구소 양자광학기술개발부

초고출력 레이저를 이용한 양성자/중성자 발생기술

으로 주어진다.

$$I_{th} = \pi \frac{h\nu^3}{\sigma} \cdot \frac{\Delta\nu_a}{c^2} \quad (2)$$

한편 고에너지 연구에서 레이저 출력강도는 그 크기에 따라 고강도(high intensity)와 초고강도(ultrahigh intensity)의 두 영역으로 분류되는데 그 경계는 10^{18} W/cm²이며 이 출력 이상의 경우가 초강도에 해당되며 이 경우에 상대론적 현상을 고려해야 한다. 이러한 레이저 출력은 편의상 다음식으로 많이 표현한다.^[4]

$$I\lambda = [1.37 \times 10^{18} \frac{W}{cm^2} \mu m^2] a^2 \quad (3)$$

여기서 $a_0 = \frac{eA_0}{mc^2}$ 는 normalized vector potential로 차원이 없는 양이고 λ 는 레이저 파장이다. $a_0 = 1$ 인 경우 전자의 떨림 속도(quiver velocity)가 빛의 속도에 다다른 경우에 해당한다. 결국 레이저 출력이 10^{18} W/cm² 보다 훨씬 작은 경우에는 위의 식에서 알 수 있듯이 $a_0 \ll 1$ 에 해당하게 되며 이 경우 전자의 떨림속도는 빛의 속도보다 훨씬 작게 되어 비상대론으로 고려할 수 있게 되는 것이다. 그러면 레이저 광에 의한 양중성자의 발생 원리에 대하여 간단히 알아보기로 한다.

그림 1은 강력한 펨토초 레이저광을 집속하여 매질에 입사시켰을 때 발생하는 여러 가지 물리현상을 보여준다. 강력한 레이저광이 입사하게되면 앞쪽의 prepulse에 의하여 매질속의 원자들은 바로 이온화가 일어나서 플라즈마 상태로 변하게 된다. 이렇게 플라즈마 상태가 되면 전자들은 자유전자 상태가 되고 계속 입사되는 레이저 광에 의하여 가속되게 된다. 이때의 전자의 가속방향은 그림에서와 같이

ponderomotive 힘에 의하여 레이저 광의 진행방향과 일치하게 되며 이온, 특히 이온중에서 가장 가벼운 양성자는 전자의 이동에 의한 space charge 효과에 의하여 가속되어 방출되게 된다.

III 레이저를 이용한 양성자 및 중성자 발생과 응용

현재 한국원자력연구소에서는 양성자 가속기 개발연구를 21세기 프론티어 사업으로 수행중에 있다. 양성자빔을 이용한 연구 및 응용분야는 기초과학부터 NT, IT, ST, BT, 의료, 국방등 아주 다양하다. 몇가지 예를 들면 이온빔을 조사시킴으로써 금속, 폴리머, 세라믹등의 여러 가지 특성을 향상시킬 수 있으며, 신종 의약품 및 DNA 변화 연구, 양성자 빔을 이용한 암치료, 항공 우주용 내방사선 부품연구, 이온빔 마스크 제작, 마이크로 렌즈 제작, 나노입자 제작 등이 가능하다. 그러나 여기에 필요한 양성자 빔을 얻기 위해서는 거대한 시설의 양성자 가속장치가 필요하게 된다. 펨토초 레이저를 이용한 양성자 발생은 상대적으로 소형의 장치에서 양성자를 발생시킬 수 있으므로 앞으로 상당히 유망한 분야라고 할 수 있다.

레이저에 의해 가속된 양성자의 고유한 특성은 다음과 같다. 우선 레이저에 의해 가속된 양성자 빔은 우리가 원하는 대로 collimate 시키거나 집속이 가능하다. 현재까지의 연구결과 레이저에 의해 가속된 양성자는 입사된 레이저 광의 각도에 상관없이 타겟 뒷면에 항상 수직방향으로 방출되는 것으로 밝혀졌다. 결국 타겟 뒷면의 구조를 변형시킴으로써 양성자빔을 집속시킬 수도 있고 또는 일직

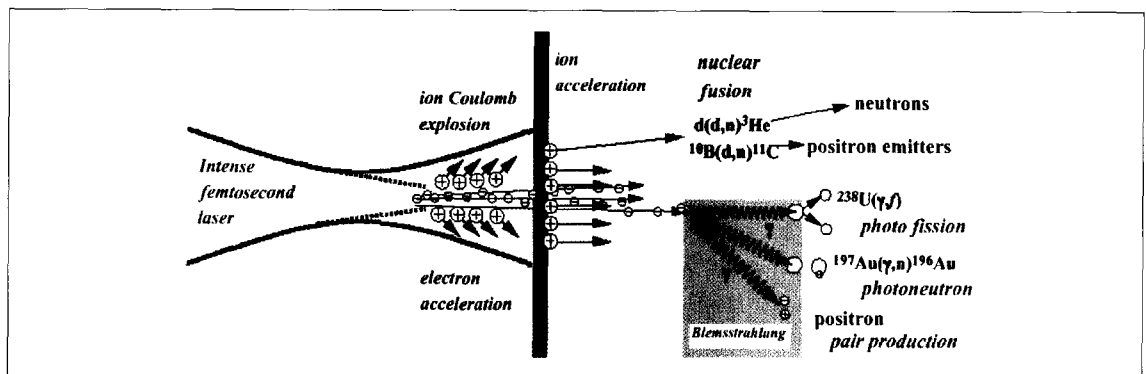


그림 1. 고출력 레이저와 물질과의 상호작용

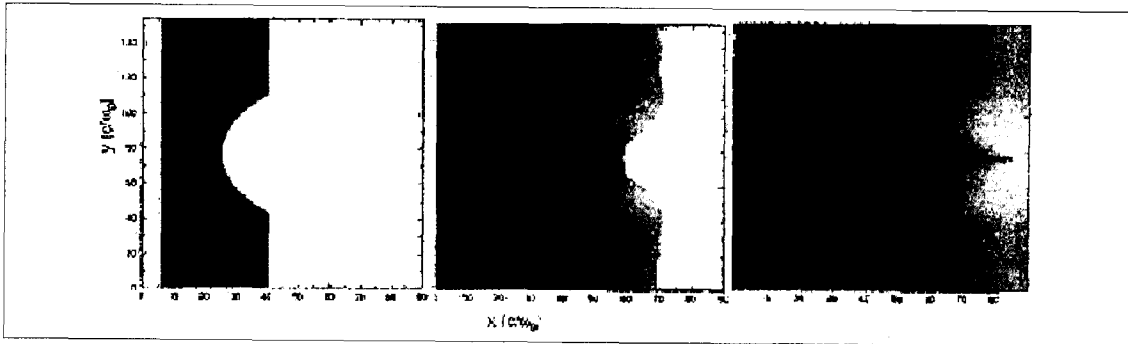
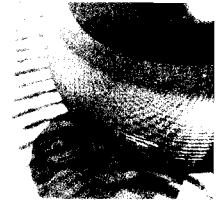
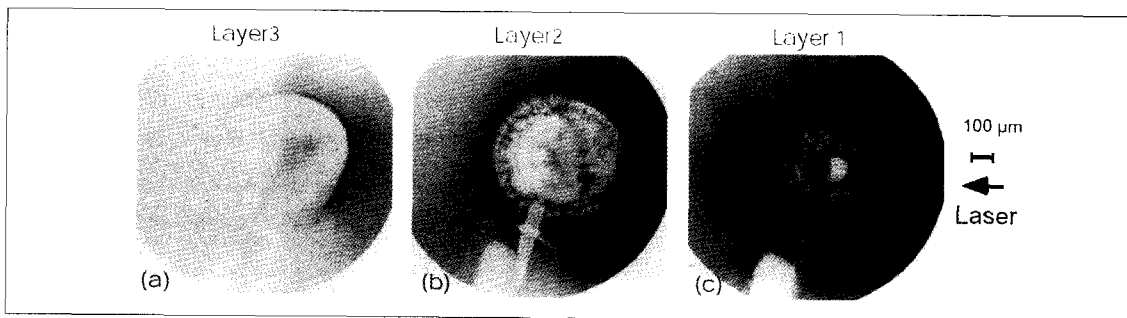


그림 2. 이온렌즈에 의하여 양성자 빔이 집중되는 모습



(a) 0 ps, (b) 10 ps, (c) 20-35ps
그림 3. 레이저를 이용하여 발생한 양성자를 이용한 플라즈마 동역학의 Radiography 영상

선 형태로 방출되도록 할 수도 있다. 그림 2는 고체 시료 타겟 뒷면을 원형으로 패이게 제작하여 ion lens를 형성시켜 발생하는 양성자 빔이 집중되고 있음을 보여주는 모의 실험 결과이다.⁵⁾

또 다른 특징은 아주 극초단 펄스에 의해 발생되기 때문에 발생된 양성자도 약 피코초 정도의 아주 짧은 시간에 아주 높은 빔 전류량을 가지고 방출된다는 점이다. 이는 기존의 다른 방법으로는 얻을 수 없는 레이저 가속 양성자만의 고유한 특성으로 이를 이용한 많은 응용분야가 앞으로 생겨날 것으로 기대된다. 그림 3은 영국의 RAL의 CLF (Central Laser Facility)를 이용하여 발생된 양성자 빔을 이용하여 시간차를 두고 발생된 플라즈마의 전하상태를 5 ps의 시간 분해능을 가지고 측정하였으며, 10 m 정도의 공간 분해능을 가지는 Radiography 영상을 얻은 결과이다.⁶⁾

이러한 양성자의 응용분야 중에서도 상당한 관심을 끄는 분야가 있다. 이는 최선의 의료용 진단장비로 그 사용이 확대되고 있는 양전자 방출 단층촬영기(Positron Emission Tomography : PET) 이다. 우리가 많이 알고

있는 X-선 전산화 단층촬영(Computer Tomography : CT)장치나 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging : MRI)는 인체의 상세한 해부학적 영상을 제공하게 된다. 그러나 방사성동위원소를 이용하는 핵의학 영상은 인체 내 생리학적 현상을 나타내는 영상을 제공한다. 이 중에서도 PET는 연구와 진단 대상이 되는 생체 내에 양전자를 방출하는 방사성의약품을 정맥주사 또는 흡입으로 주입한 후 이물질의 체내 분포를 영상화한다. PET은 여러 가지 생리적, 병리적 기본이 되는 생체 내 생화학적 현상을 비침습적으로 간단하고 정확하게 영상화하고 정량화 할 수 있는 장점이 있다. PET 영상을 이용하여 혈류량, 기저대사율 및 합성율과 같은 생화학적 현상을 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 신경수용체와 전달체 농도 그리고 더 나아가 유전자의 영상화도 가능하다. 이것은 CT나 MRI로 얻어지는 형태학적 영상과는 달리, PET 영상은 생화학적 현상의 영상화한 기능영상을 제공함으로써 질병의 생물학적 현상규명이나 난치성 뇌신경계 질환, 악성종양의 조기진단과 치료방법 결정 및 예후 평가, 심근 생존능 검사등을 가능하게 해준다.⁷⁾

초고출력 레이저를 이용한 양성자/중성자 발생기술

이러한 PET에 사용되는 방사성동위원소는 양성자를 이용한 (p,n) 또는 (p, α) 핵반응을 통해 제조되게 된다. 양전자 방출 핵종은 핵 내부의 양성자 대 중성자의 비가 높은 불안정한 핵종으로서 이들은 양전자를 방출함으로써 안정화된다. 양전자(positron)는 양전자 방출체 핵종의 β^+ 붕괴 과정에서 중성미자와 함께 일정량의 운동에너지를 가지고 방출되어 주변 물질에 있는 전자와 충돌하면서 그 에너지를 잃게된다. 정지상태에 이른 양전자는 전자와 결합하여 180° 방향으로 방출하는 511 keV 에너지의 소멸 감마선으로 변환된다. 결국 서로 정반대 방향으로 방출되는 511keV의 감마선을 검출함으로써 그 위치를 정확하게 파악할 수 있게된다.^[8] 현재 PET에 사용되는 방사성 화합물들은 500여종에 이르고 있는데 물, 산소, 이산화탄소, 포도당, 아미노산, 지방산 등에 ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O, ¹⁸F 등을 표지하여 C¹⁵O, [¹³N] ammonia, H₂¹⁵O, [¹⁸F]FDG(2-fluoro-2-deoxy-D-glucose) 등으로 합성한 양전자 방출체들로 반감기가 짧아 주로 의료용 싸이클로트론에 의해 생산되게 된다. 의료용 싸이클로트론은 그 목적에 따라 그 가속 에너지가 다르지만 약 10-20MeV정도의 용량이 많이 사용된다. 예를 들면 현재 삼성서울병원의 경우 16.5MeV의 proton beam line을 가지고 있다. 일반적인 싸이클로트론이 100 μ A, 10MeV의 양성자를 생산한다면 이는 초당약 6x10¹⁴ 개의 양성자를 생산하는 것이다. 일반적으로 60kg 인 환자의 1회 PET 촬영에 사용되는 방사능은 약 10mCi로 약 4x10¹²개의 ¹⁸F원자가 필요하게 된다. 싸이클로트론

을 이용하면 약 10초 정도면 생산이 가능한 수치이다.^[9] 그러나 실제의 경우 반감기가 짧기 때문에 화학공정과정 및 이동시간 동안에 줄어드는 방사능을 고려하여 이 양보다 몇 배의 방사성 동위원소를 생산하게 된다.

그러나 싸이클로트론의 경우 고가의 장비이며 20ton 정도의 고중량에 두꺼운 콘크리트 벽으로 방사능 차폐가 되어 있는 건물내에 설치해야 하는 번거로움이 있으며 이동이 불가능하다. 반면에 레이저를 이용한 양성자 발생의 경우 소형이고 시료가 있는 타겟부분만 국부적으로 차폐를 하면 되므로 여러 가지 장점이 있다. 다만 현재 싸이클로트론의 경우도 가격이 저렴해지고 있는 추세에 있으므로 상대적 가격 경쟁력의 경우는 앞으로 면밀한 조사가 필요할 것이다. 현재 일본의 원자력연구소에서는 레이저 시스템을 차량탑재형으로 개발하여 이동식 PET용 동위원소 제조장치를 개발하려는 시도가 있다.

그림 4는 레이저 강도에 따른 발생된 양성자의 에너지를 보여주는 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이저 강도가 약 10¹⁹ W/cm²의 출력이면 발생된 양성자의 에너지가 약 10MeV에 이르러 싸이클로트론의 경우와 비슷한 에너지를 갖는 것을 알 수 있다. Zepf 등은 10¹⁹ W/cm²의 출력에서 5MeV 이상의 양성자를 적어도 3x10¹⁰ 개를 얻었으며 10²⁰ W/cm²의 출력에서는 3x10¹² 개를 얻었다고 보고하였다.^[10] 미국 LLNL의 Snavely 등은 3x10²⁰ W/cm²의 출력에서 10MeV이상의 양성자를 2x10¹³ 개를 얻었으며 이는 흡수된 레이저 에너지의 12%에 해당하는 높은 효

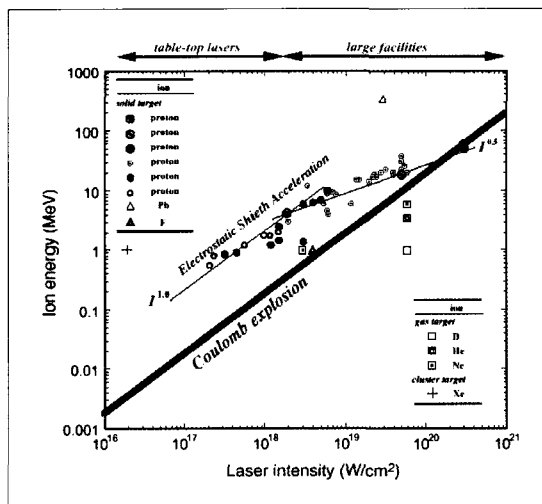


그림 4. 레이저 출력과 그에 의해 발생하는 양성자 빔의 에너지

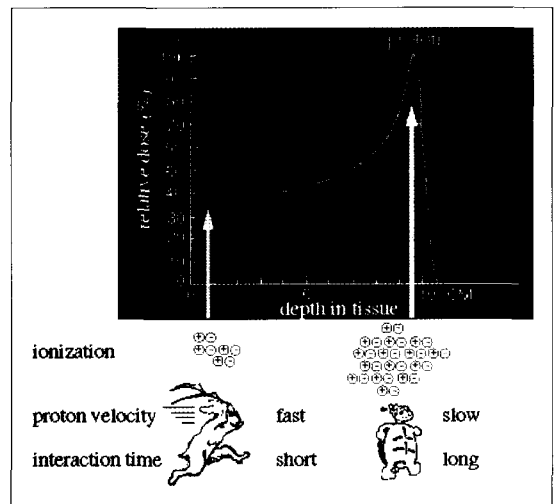


그림 5. 양성자빔의 피부 투과거리에 따른 방사능 조사선량의 변화 및 Bragg peak



올이다.^[11] 영국의 Spencer등은 RAL의 Vulcan 레이저를 이용하여 37MeV의 에너지를 갖는 양성자빔을 발생시켰다고 보고하였으며 현재는 소형의 Ti:sapphire 레이저인 Astra 시스템을 이용한 양성자 발생 연구를 수행하고 있다.^[12]

양성자 빔의 또다른 의학적 이용분야는 양성자 암치료 (proton oncology)분야이다. 양성자 빔이 신체의 조직속으로 입사되면 세포속에서 이온화가 일어나게 되며 세포의 크로모솜(Chromosome)에 있는 DNA를 파괴시키는 활성 라디칼이 생성된다. 이 파괴의 정도가 심하게 되면 세포는 더 이상 복구가 불가능하여 더 이상 증식되지 않게 된다. 만일 정상조직이 암조직에 비하여 복구능력이 뛰어나게 되면 정상세포의 손상을 최소화 시키면서 암세포만을 선택적으로 제거할 수 있게 되는 것이다. 또한 양성자 빔은 Bragg peak라는 특이한 물리적 성질을 가지고 있는데 그림 5와 같이 속도가 느려진 마지막 순간에 훨씬 많은 운동 에너지를 전달하고 소멸되는 특성을 가지고 있다. 이 특성은 기존의 X-선이나 전자와는 확연히 다른 특성으로 신체 내부에 퍼져있는 암조직을 파괴시킬 때 아주 유용한 특성이다. 이 양성자 암치료는 현재 미국, 유럽, 일본등 17개 기관에서 시술 중에 있으며 앞으로 점차 확대될 전망이다. 그러나 10-20cm 정도 깊이까지 침투하기 위해서는 100-200MeV 정도의 양성자 에너지가 필요하며 현재는 싸이클로트론에 의해 가속된 양성자를 이용하고 있는 실정이다. 그러나 레이저 출력이 증가하고 효율적인 양성자 방출 시료가 개발되면 레이저가 싸이클로트론을 대체할 가능성도 있는 분야라고 생각된다.

양성자 발생과 더불어 대표적인 핵자는 중성자이다. 핵 중성자 발생연구는 크게 두가지 방향으로 나누어 진다. 첫 번째는 레이저 핵융합 관련 연구이다. 레이저 핵융합이 일어나면 D-D 핵반응($D+D=n+{}^3\text{He}$)에 의한 중성자가 발생하게 되는데 이 경우 2.45MeV의 고유한 에너지를 갖는 중성자가 발생되게 된다. 이 중성자 발생은 핵융합 발생의 증거에 해당되므로 이 중성자를 fusion neutron이라고 부른다. 레이저 핵융합 연구를 하는 많은 기관에서는 이의 관측을 위한 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 연구는 미국, 일본, 영국, 프랑스, 러시아, 중국등 핵융합용 대규모 레이저 시설을 중심으로 진행되어지다가 1999년도에 Ditmore가 소규모 펄스초 레이저를 이용하여 10^{16} W/cm²의 출력에서 10⁴개의 fusion neutron 발생을 보고함으로써

전 세계적으로 많은 연구들이 진행되고 있다.^[13]

다음으로는 중성자 자체의 발생을 포함한 레이저-플라즈마 상호작용 연구이다. 중성자는 그 자체로도 많은 응용 분야가 있는데 레이저에 의해 발생되는 중성자는 아주 좁은 영역에서 발생되어 점중성자원(point neutron source)으로 활용이 가능하다. 이 경우에는 그림 1에서 소개한 바와 같이 고에너지의 양성자를 시료에 충돌시켜 중성자를 발생시키는 방법이 상당히 유용하다. Disdier 등은 중앙자 폴리스티렌 타겟을 이용하여 수 10^{10} W/cm²의 출력에서 10⁷개의 고속중성자 발생을 보고한 바가 있다.^[14] 지면 관계상 자세한 설명은 하지 않지만 중성자 발생과 고온의 전자 발생, x-선, 감마선 발생 등은 실험의 조건에 따라서 동시에 발생되기도 하며 각각의 특성을 조사하는데 서로 중요한 정보를 제공한다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 4에 소개된 책을 참고하기 바란다.

IV. 결론

1990년대 초까지는 핵융합 에너지 개발을 주목적으로 하여 수백 J - 수 kJ의 고에너지와 ns 영역의 펄스폭을 갖는 고출력 레이저 시스템이 일부 선진국을 중심으로 개발되었다. 이러한 고에너지, 고출력 레이저는 대형으로 제작이 용이한 Nd:glass 레이저 증폭 매질을 기반으로 한 대규모 레이저 시스템이었다. 미국의 NOVA, 일본의 Gekko XII, 중국의 신평, 영국의 VULCAN 등이 이러한 예이다. 현재는 이러한 대규모 Nd:glass 레이저 기술을 더욱 고도

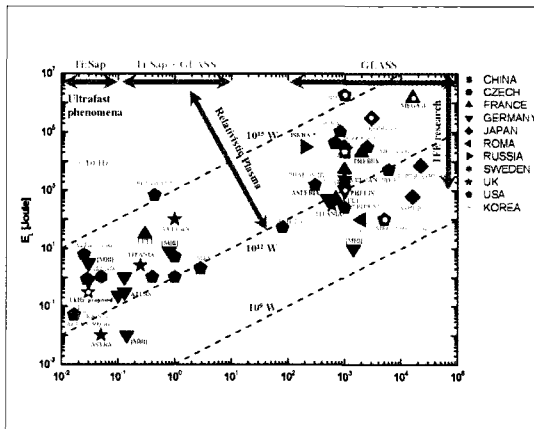


그림 6. 고출력 레이저의 세계적 개발 현황 (빈 원으로 표시된 것은 현재 개발 중인 레이저이며 가로축 단위는 피코초이다.)

초고출력 레이저를 이용한 양성자/중성자 발생기술

화하여 레이저 핵융합 에너지의 실증을 위한 MJ (10^6 J) 급 레이저를 미국(NIF)과 프랑스(MEGA-J)에서 제작하고 있다.

그러나 1990년대부터 소형의 극초단 초고출력 레이저의 제작이 가능해지면서 이제는 많은 소규모의 연구진들에게도 레이저-플라즈마 연구가 가능하게 되었다. 국내에서의 핵자빔 발생의 경우는 포항의 방사광 가속기를 이용한 X-선 발생 연구가 진행 중이며, 양성자의 경우 원자력 병원에서 cyclotron 개발 연구와 한국 원자력 연구소에서 양성자 가속기 개발이 진행 중이며 아울러 Compton 산란을 이용한 감마선의 발생에 관한 연구도 수행 중에 있다. 현재 국내의 고출력 레이저 개발 수준은 세계적인 수준에 비해 아직 상당히 미약한 형편이다. TW급의 레이저 개발사례로는 2건밖에 없으며, 이중 현재까지 운영 중에 있는 TW 레이저는 1기에 불과하다. 이들 TW 레이저도 모두 한국과학기술원 물리학과에서 제작한 것으로서 대학 연구소 수준의 규모로 제한되어왔다. 그밖에 최근 포항공과대학교와 한국전기연구원에서 TW급 레이저를 제작 또는 구입하여 설치, 운용하고 있는 것이 국내에서 운영되고 있는 TW 레이저의 전부라고 할 정도이다.

그러나 펨토 기술에 대한 인식이 확산되면 이에 대한 연구가 더욱 활성화 될 것으로 기대하며, 현재 일본, 중국 등과 이 분야에서의 활발해진 교류를 생각하면 그 미래도 상당히 밝다고 생각된다. 그 중에서도 양성자, 중성자와 같은 핵자빔 발생 기술개발과 이의 응용연구도 상당히 전망이 있는 분야라고 생각되며 이에 대한 많은 관심을 바라며 이 글을 맺는다.

- [1] C. V. Shank, E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett. 24, 373 (1974).
- [2] D. Strickland, G.A. Mourou: Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- [3] D. E. Spence, P. N. Kean & W. Sibbett, Opt. Lett., 16 42 (1991).
- [4] J. Meyer-ter-Vehn et al. in Atoms, Solids, and Plasmas in super-intense Laser fields (D. Batani, C. J. Joachain, S. Martellucci, and A. N. Chester Eds., Kluwer Academic/Plenum Pub. New York 2001) pp. 167-169.
- [5] S.C. Wilks et al., Phys. Plasmas 8(2), 542-549 (2001).
- [6] M. Borghesi et al., CLF Annual Report 2000/2001, pp.7-9.
- [7] 최용, 이정림, 대한핵의학기술학회지 1, 26 (1996).
- [8] 물리학과 첨단기술 1999년 8월호.
- [9] J. M. Dawson, Fusion Tech. 22, 98 (1992).
- [10] M. Zepf et al. Phys. Plasmas 8, 2323 (2001).
- [11] R. A. Snavely et al. Phys. Rev. Lett. 85, 2945 (2000).
- [12] I. Spencer et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 183, 449-458 (2001).
- [13] T. Ditmire et al. Nature 398, 489-491 (1999).
- [14] L. Disdier et al., Phys. Rev. Lett. 82(7) 1454-1457 (1999).



2003 - 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소 및 정보통신공학과 교수로 재직중
 1992 - 2003 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 책임연구원
 2000 - 2001 조선대학교 겸임교수
 1997 - 1998 영국 맨체스터 대학교 객원 연구원
 1992 서울대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
 1987 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
 1985 서울대학교 물리학과 (이학사)
 E-mail : dkko@kjist.ac.kr