



S & T 파일 >>>

순간출력 1천TW 도전 .. 극초단 광양자빔 연구

글_이종민 광주과학기술원 신소재공학과 교수 leejm@kjist.ac.kr

시간과 공간은 인간이 자연현상을 이해하고 기술하는데 필요한 가장 기본적인 개념으로, 고대로부터 인간이 자연을 인지하는 가장 기본적인 물리 단위였다. 인간은 과학기술의 발전을 통하여 점점 더 짧은 시간에 더 빠른 현상을 탐구할 수 있게 되었고, 점점 더 작은 공간에서 점점 더 작은 물체를 들여다 볼 수 있게 되었다. 과학기술의 발전과정에서 더 짧은 시간을 들여다 볼 수 있는 시간 분해능과 더 작은 공간에 대한 탐지 능력인 공간 분해능의 확장은 과학기

술의 전문분야에 광대한 영향을 끼쳐 왔다. 시·공간 분해능을 향상시키는 새로운 기술의 발전은 과학기술개발의 새로운 장을 개척하는 돌파구 역할을 하였고, 이러한 돌파구를 통해 과학기술은 비약적인 발전을 하게 되었다.

시간 분해능은 매우 오랫동안 인간의 인식에만 의존하다 근대 과학기술의 발전으로 비약적으로 향상되었다. 1800년까지만 하더라도 물리, 화학적 과정의 시간 기록은 인간의 감각적 인식에 의존하였다. 예를

들면 시계의 움직임을 볼 수 있는 시력이나 소리를 인식할 수 있는 청력에 의존하였고, 눈의 깜박임(약 0.1 초)이나 귀의 반응보다 빠른 움직임은 인간의 탐구영역을 넘어서는 것이었다. 19세기 들어서서 기술의 발전은 이러한 한계를 급속도로 변화시키게 되어 스냅 사진술에 의하여 1초 이하 영역의 시간 간격을 측정할 수 있게 되었으며, 20세기 중반에 이르러서는 스트로보스코프(섬광촬영장치)의 발전으로 밀리 초에서 마이크로초의 정밀도까지 측정이 가능하게 되었다.

극초단 펄스 레이저기술 발달로 펨토 과학기술 태동

1960년대초에 레이저 펄스폭을 줄일 수 있는 기술이 개발되어 나노초 시대가 열리게 된 이후 1960년대 중반에 펄스폭을 더욱 줄일 수 있는 모드 잠금 기술이 개발되어 피코초(피코초=1조분의 1초= 10^{-12} 초) 시대가 도래하였다. 그 이후 1972년 E. Ippen에 의하여 모드 잠금 기술이 더욱 개발되어 펨토초의 펄스 레이저 광을 얻을 수 있게 되었다. 현재까지 세계적으로 가장 짧은 레이저 펄스폭은 4펨토초이며 1999년도에 기네스북에 가장 짧은 펄스로 기록되었다. 최근에는 고출력 펨토초 레이저 펄스를 불활성 기체 매질과 반응시켜 고차조화파를 발생시키는 방법으로 아토초(100 경분의 1 초= 10^{-18} 초) 영역의 펄스를 만드는 방법도 개발되었다.

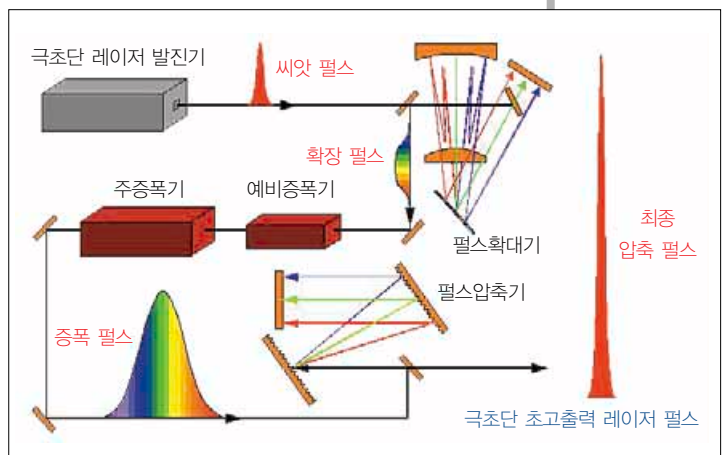
80년대 중반 티타늄사파이어(Ti: Sapphire)라는 새로운 레이저 매질이 개발되고, 새로운 방식의 모드잠금 레이저 기술의 향상이 있었다. 또한, 1985년 로체스터 대학의 제라드 모루(G. Mourou) 교수(현재는 미시간 대학) 그룹에서 펨토초 펄스를 고출력으로 증폭하는 기술인 처프펄스증폭(Chirped pulse amplification: CPA) 기술을 개발하였다(그림 1). 이러한 극초단 레이저 기술의 급속한 발달에 힘입어, 90년대 중반 이후 소형의 펨토초 레이저는 전세계의 많은 연구실에서 매우 광범위한 연구 분야에 응용되고 있다.

실제 물질내의 분자들이 형성되고 반응하는 화학결합은 놀라울 정도로 빠른 속도로 깨지고 형성되며 위

지 변화를 일으킨다. 화학결합 등 분자 및 원자영역의 동역학을 기록하기 위하여 약 100펨토초(펨토초=1천조분의 1초= 10^{-15} 초) 정도의 시간 분해능이 필요하다. 결국 펨토초의 시간 분해능을 갖게 되면 물질의 평형 상태에 이르기 전의 상태를 연구할 수 있고 원자나 분자의 진동운동과 회전운동보다 빠른 상태에서의 물리적, 화학적, 생물학적 변화를 관측할 수 있게 된다. 아흐메드 제와일(Ahmed Zewail) 교수는 펨토초 레이저를 이용하여 초고속 펨토 화학반응을 규명한 공로로 1999년도에 노벨 화학상을 수상하였다. 펨토초 펄스 레이저 기술의 발달로 물리, 화학, 생물학 등 다양한 분야에서 펨토초 시간분해능으로 극초단 자연현상을 규명하고 초고속 응용기술을 개발하는 펨토과학기술이 새로운 학문 분야로 자리잡고 있다.

극초단 시간분해능, 초고강도 순간출력

펨토초 펄스레이저를 초고출력으로 증폭한 극초단 펄스 레이저 빔과 이를 미소공간에 집속하여 발생시킨 다양한 제2차 펄스 선원들을 통칭하여 극초단 광양자빔이라 한다(그림 2). 극초단 광양자빔은 이전에는 상상할 수 없었던 극한의 시간 분해능을 제공한다. 또한, 정해진 에너지를 매우 짧은 시간 동안만 방출함으로써 순간 출력이 매우 강한 특성을 갖는다. 이는 기체의 공기압력과 부피의 관계를 고려하면 쉽게 이해될 수 있다. 기체 분자의 수가 일정할 때 부피를 줄



(그림 1) 처프증폭기술을 이용한 극초단 고출력 레이저 개념도

이때 줄일수록 압력은 그에 따라 증가한다. 이와 마찬가지로, 에너지량을 일정하게 하고 시간을 줄이면 줄일수록 순간 출력의 세기는 증대한다.

극초단 레이저빔의 펄스에너지는 수십 줄(joule) 정도이지만 이 에너지를 펨토초의 매우 짧은 시간에 집중하여 방출하므로 순간 출력은 페타와트(페타와트=1천조와트=10¹⁵ 와트) 수준에 이른다. 페타와트의 출력은 2003년 우리 나라 전체 발전 용량인 56 기가와트의 2만 배 정도에 이르는 출력 규모이다. 극초단의 시간분해능 및 초고강도의 순간출력과 함께 극초단 광양자빔의 또 다른 특징은 기존의 레이저와는 달리 매우 넓은 파장 선포를 갖는 데 있다. 기존의 레이저와는 다른 극초단 광양자빔의 특성을 이용하여 극초단 현상 연구 뿐만 아니라, 넓은 파장선포를 응용한 초정밀 파장 표준 연구, 강력한 순간출력을 이용한 초고속 비선형 현상에 대한 다양한 연구들이 매우 활발하게 진행되고 있다.

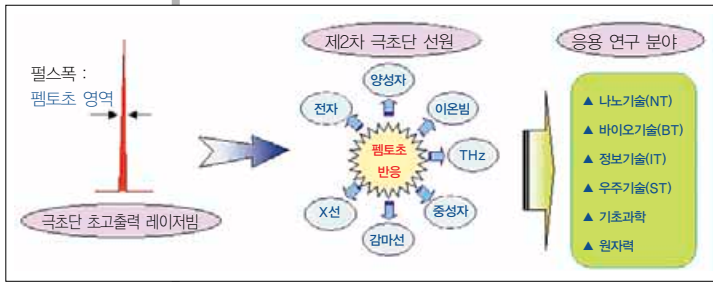
초미세 가공 및 NT분야 등에 응용

현재 우리가 사는 세계는 점점 더 빠른 초고속의 세계로 나아가고 있다. 극초단 광양자빔은 현재의 초고속보다 더 빠르게 작동하는 미래의 초고속 첨단 과학기술 제품을 개발하는 모든 분야에 응용될 수 있다. 일상 생활에 사용하는 컴퓨터나 또는 통신의 경우를 고려해 보자. GHz의 연산속도를 자랑하는 최신의 PC는 나노초에 한번의 연산을 하고, 차세대 THz 광통신은 피코초에 하나의 신호를 보낸다. 이와 같은 첨단 과학기술 제품은 나노초, 피코초 시간영역의 고속현상을 탐구할 수 있는 과학기술에 기반한 제품이다. 이

보다 더 빠른 피코초나 펨토초로 동작하는 초고속의 첨단 과학기술 제품은 이것의 기반이 되는 펨토초 과학이 발전되어야만 가능한 것이다. 이와 같이 극초단 광양자빔은 극초단 시분해능을 이용하여 펨토초 영역의 극초단 현상을 탐구하고 응용하는 과학기술 분야에 직접적으로 활용된다. 예를 들어, 반도체의 펨토초 동역학 연구, 펨토 화학 연구, 펨토 생물학 연구, 펨토 초 시분해 분광학 연구, 초고속 광소자 개발 등에 이용된다. <그림 3>은 항암작용에서 매우 중요한 역할을 하는 DNA에서 전자전달과정을 펨토초 레이저로 규명하는 것을 나타낸다.

초고강도의 극초단 광양자빔을 매질에 집속하면, 기존에는 불가능하였던 초고강도 전자기장하에서의 새로운 물리화학적 현상에 대한 연구를 할 수 있다. 레이저빔의 집속강도가 10¹⁴~10¹⁵ W/cm²를 불활성기체 등에 집속하게 되면 입사된 레이저 주파수의 고차 조화파인 극초단 X-선(파장 4nm까지)이 발생된다. 또한, 레이저 출력이 10⁹ W/cm²에 이르게 되면 레이저 전자기장내에서의 전자들의 떨림속도가 상대적으로 변하게 된다. 이러한 초고속 레이저를 이용하면 이제껏 어떠한 방법으로도 얻지 못하였던 엄청난 전자기장과 압력, 온도를 얻을 수 있어서 지금까지와는 완전히 다른 영역의 물리현상을 연구 조사하게 된다. 예를 들면, 레이저 폭발에 의하여 생성된 플라즈마 지구 자기장내에서 어떻게 움직이는지를 조사함으로써 우주 폭발에 대한 모델을 수립하는 연구와 같은 천체물리연구를 실험실에서 수행할 수도 있게 된다. 이러한 초강력 레이저와 플라즈마 상호작용 연구는 플라즈마 파동에 의한 입자가속, 관성핵융합 연구, 나노 스케일 홀로그래피용 X-선원 개발 등과 밀접한 관련이 있다. 이러한 연구분야는 현재 전세계적으로 많은 주목을 받고 있으며 수많은 연구논문이 쏟아져 나오고 있다.

극초단 광양자빔을 이용한 재료가공은 주로 미세한 구멍이나 절단 또는 특정물질을 선택적으로 제거하는 작업으로서 나노테크놀로지에 해당하는 극도의 정밀 가공이다. 펨토초 펄스를 이용하게 되면 빛의 흡수에



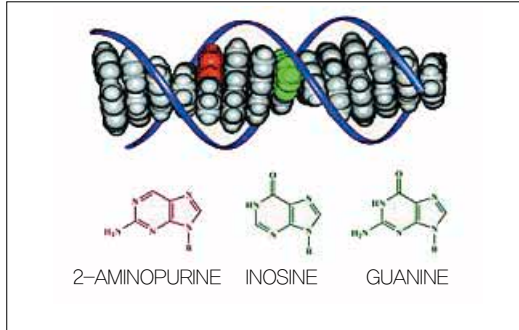
<그림 2> 극초단 광양자빔 발생 및 응용

의하여 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 가공이 끝나게 되어 가공부의 주변에 어떠한 손상이나 구조 변화를 일으키지 않는 장점이 있다. 펨토초 가공은 일반적인 다른 가공과는 달리 매질을 녹이는 것이 아니고 매질의 화학적 결합을 끊어내어 날려버리기 때문에 일반적인 가공에서 나타나는 열에 의한 매질의 변형이 발생하지 않는다. 또한, 펨스폭이 극도로 짧은 반면 침투출력은 아주 높아서, 일반적으로 가공물질이 투명한 매질일지라도 다광자흡수과정에 의하여 레이저광의 흡수가 일어나 가공이 가능하게 됨으로써 가공매질의 종류에 구애받지 않는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 재료 무의존성 마이크로 및 나노 가공, 의료 분야의 초정밀 레이저 시술, 반도체 제조 공정의 결함 수리 및 제거 등의 분야에서 응용연구가 활발히 진행되고 있다.

국내 극초단 광양자빔 연구시설 2008년 완공

극초단 광양자빔을 이용하여 이전까지는 불가능하였던 극한 시간분해능이 가능하고, 초고강도 전자기장 발생이 가능해짐에 따라, 그 파급효과가 전과학·기술 분야에 미치고 있다. 현재 이러한 펨토초 과학·기술 분야에 대한 연구는 전세계적으로 활성화되고 있다. 일본, 미국, 영국 등에서는 몇 년 전부터 극초단 광양자빔 연구시설을 설치하여, 초고강도 전자기장 물리, 펨토화학, 생물학 등의 분야에서 다양한 연구를 수행하고 있다. <그림 4>는 다양한 펨토 과학기술분야 연구를 위해 일본에서 구축중인 극초단 광양자빔 시설(JAERI-APR)을 나타낸다.

국내에서도 대학 및 연구소의 연구그룹들이 극초단 펨스의 발생에 대한 연구를 하고 있으며, 극초단 펨스 레이저의 증폭에 대한 연구도 수 테라와트(테라와트=1조 와트=10¹² 와트=TW) 수준까지 진행되어 왔다. 저출력 응용연구는 국내에서도 펨토 물리, 펨토 화학, 펨토 생물학, 초미세 나노가공 분야 등에서 매우 우수한 연구결과들이 나오고 있다. 또한, 국내의 펨토초 과학·기술에 대한 응용연구가 활발해짐에 따라, 응용연구의 광원으로 사용되는 극초단 고출력 펨스 레



<그림 3> DNA에서의 전자 전달 동역학 연구

이저 시설의 필요성도 점점 커져 왔다. 이에 따라, 국내에서도 극초단 초고속 자연현상을 규명하는 펨토초 과학기술 연구와 초고강도 전자기장하에서의 물리·화학적 현상 연구에 필요한 고출력 광원을 마련하기 위해, 펨토초 시간영역의 극초단 초고강도 펨스레이저 공동연구시설이 구축되고 있다.

국내의 극초단 광양자빔 연구시설은 광주과학기술원 고등광기술연구소에 설치가 되고 있고, 현재 25TW(25조 와트) 출력의 30펨토초 극초단 레이저빔을 발생하였다. 2008년 전체 시설이 완료되면 1천TW(페타와트)급 출력으로 세계 6위 정도의 출력규모가 될 것이다. 이 연구시설은 이용을 원하는 모든 연구자에게 개방된 국가이용자시설(National User Facility)로 운영된다. 국내에 이와 같은 극초단 광양자빔 연구시설이 설치됨에 따라, 펨토초 과학기술 분야의 응용 연구가 매우 활성화될 전망이다.

현재까지는 국내에서 연구가 불가능하여 외국의 시설을 이용하여 수행할 수밖에 없었던 초고출력 레이저 응용 연구를 국내에서 수행할 수 있게 되었을 뿐만 아니라, 국제회의에서 '세계공용시설(Global User Facility)'로 선정됨으로써 외국의 관련 연구자들도 고등광기술연구소에 설치되는 극초단 광양자빔을 이용하여 펨토과학기술 응용연구를 수행할 수 있게 되었다. 따라서, 한국이 이 분야의 세계적 연구중심지로 도약할 수 있을 것으로 기대된다. ㉓



글쓴이는 국방과학연구소 전자광학부 실장, 한국원자력연구소 미래원자력기술개발단 단장, 한국 광학회 회장을 지냈고, 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소장을 겸임하고 있다.