

초청강연

" 펨토과학 기술의 현황 "

이종민 소장
(고등광기술연구소)

펨토 과학기술의 현황

Current Research and Development in Femto Science and Technology

고등광기술연구소 이종민

1. 서론

“시간”과 “공간”은 인간이 자연을 이해하는 가장 기본적인 개념이었다. 과학기술의 발전과정에서 시간과 공간 분해능의 향상은 과학기술의 전 분야에 걸쳐 새로운 장을 개척하는 돌파구 역할을 하였다. 1960년대 초에 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. 80년대 중반에 새롭게 등장한 Kerr lens 모드 잠금 기술과 극초단 펄스 생성에 적합한 Ti:sapphire 고체 이득매질의 개발로 펨토초 펄스 레이저의 안정성과 신뢰성이 크게 향상되게 되었다. 현재까지 세계적으로 가장 짧은 레이저 펄스폭은 4 펨토초이며 1999년도에 기네스북에 가장 짧은 펄스로 기록되었다. 최근에는 고출력 펨토초 레이저 펄스를 불활성 기체 매질과 반응시켜 고차조화파를 발생시키는 방법으로 아토초(100경분의 1초= 10^{-18} 초) 영역의 펄스를 만드는 방법도 개발되었다. 또한, 1985년 로체스터 대학의 G. Mourou 교수 그룹에서 펨토초 펄스를 고출력으로 증폭하는 기술인 처프펄스증폭(Chirped pulse amplification; CPA) 기술을 개발하였다. 이러한 극초단 레이저 기술의 급속한 발달에 힘입어, 90년대 중반 이후 소형의 펨토초 레이저는 전 세계의 많은 연구실에서 매우 광범위한 연구 분야에 응용되고 있다. 또한, 초고출력 안정적이고 신뢰성 있는 펨토초 레이저의 보급은 전 세계의 다양한 실험실에서 펨토초 시간영역의 과학기술 연구를 활성화하는 기폭제가 되었다.

본 논문에서는 펨토 과학기술의 몇 가지 분야에 대한 현황과 광주과학기술원(부설)고등광기술연구소에서 구축하고 있는 초고출력 펨토초 레이저 시설을 소개한다.

2. 펨토 과학기술의 현황

펨토초 펄스 레이저가 제공하는 극초단 시간분해능을 이용하여, 물리, 화학, 생물 등 매우 광범위한 분야의 초고속 현상에 대한 다양한 탐구와 응용기술 개발이 수행되고 있다. 반도체, 금속, 고분자 등에서 일어나는 초고속 동역학 연구, 초고속 화학반응 연구, 실시간 생체 세포 관측 등 매우 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 초고속 현상에 대한 동역학 연구는 주로 pump-probe(여기-탐침) 시간분해 분광법을 이용하여 수행된다. 광세기가 강한 pump 광으로 시료를 여기상태로 들뜨우고, 시간지연을 가진 약한 probe 광으로 시간에 따른 변화를 측정한다. 이러한 pump-probe 외에도, streak camera를 이용하는 방법, 시간분해 축퇴 4광과 분광법, 시분해 결맞는 라만 분광법, 다광자 흡수 분광법 등 다양한 방법으로 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 화학반응은 수백 펨토초에서 피코초 정도의 시간이 걸린다. 이와 같은 화학 반응에서 그 중간 과정을 탐구하기 위해서는 수십 펨토초의 시간분해능이 필요하다. 펨토초 레이저를 이용하여 초고속 화학반응을 규명한 공로로 Ahmed Zewail 교수는 1999년도에 노벨 화학상을 수상하였다. 초고속 화학 반응 연구에는 매우 다양한 파장의 펨토초 레이저가 이용되고 있다. Ti:sapphire 레이저의 출력 파장인 800 nm 대역뿐만 아니라, 비선형 결정을 이용한 파장변환을 통하여 발생시킨 가시광 및 자외선, 적외선 영역의 펨토초 광펄스도 이용되고 있고, 고차 조화파 발생을 통한 X선 영역의 극초단 광펄스도 이용되고 있다.

펨토초 레이저의 또 다른 특성은 펄스폭이 매우 짧기 때문에 평균출력에 비해 광펄스의 첨두출력이

매우 크다는데 있다. 비선형 광학 현상은 빛이 강할수록 크게 일어나기 때문에, 펄스 레이저를 이용하면 강한 비선형 광학 신호를 얻을 수 있다. 펄스 비선형 광학은 기존의 비선형 현상을 펄스 영역에서 탐구하는 기초연구뿐만 아니라, 효율이 좋은 비선형 광학 소자 및 장치의 개발에까지 영역을 확장하고 있다. 이러한 펄스 비선형 광학은 4광파 혼합, 라만 분광법, 파장변환 등 다양한 분야의 연구개발에 이용되고 있다.

특성이 좋은 비선형 광학 물질과 몇 가지의 광학 소자만 있으면 조화파 발생, 합주파수 발생, 차주파수 발생, 광 매개 과정, 라만 산란, 백색광 발생 등과 같은 과정을 통해 다양한 파장의 펄스 광을 만들 수 있다. 이와 같은 파장변환 방법을 이용한 펄스 광 발생장치는 이미 다양한 제품이 출시되어 연구 및 산업 응용으로 사용되고 있다. 비선형 광학 효과를 키우기 위해서는 위상정합을 이루어야 한다. 그런데 펄스 비선형 광학에서는 이 조건뿐 아니라 관련 빛들의 군속도가 일치되고, 파장 대역폭이 넓은 조건도 동시에 만족하여야 한다. 최근에는 이러한 조건을 맞추기 위하여 준 위상 정합 물질에 대한 연구가 진행되고 있다. 단결정 대신에 1990년대부터 개발되고 있는 준 위상 정합 물질(PPLN, PPKTP 같은 물질)을 이용하면 훨씬 융통성 있게 요구되는 규격의 물질을 만들 수 있다.

펄스 비선형 광학을 응용한 파장 변환의 또 다른 분야는 THz 전자기파 발생과 microstructure 광섬유 등을 이용하여 매우 넓은 주파수 선폰을 갖는 백색광(super continuum)을 발생시키는 것이다. 이러한 백색광은 분광학 분야와 optical coherence tomography 등에 활용되고 있다. 또한, 백색광의 스펙트럼을 한 octave 선폰보다 더 넓게 발생시켜, 넓은 주파수 선폰을 이용하여 절대적인 광주파수의 측정에 이용하고 있다. THz 광원은 다른 주파수의 전자기파와 비교하여 에너지가 낮아서 생체나 물질에 거의 영향을 주지 않으면서도 높은 공간 및 시간 정밀도로 다양한 특성을 측정할 수 있는 장점이 있다.

펄스 레이저를 가공분야에 이용하게 되면, 빛의 흡수에 의하여 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 가공이 끝나게 되어 가공부의 주변에 어떠한 손상이나 구조변화를 일으키지 않는 장점이 있다. 펄스 가공은 일반적인 다른 가공과 달리 매질을 녹이는 것이 아니고 매질의 화학적 결합을 끊어내어 날려버리기 때문에 일반적인 가공에서 나타나는 열에 의한 매질의 변형이 발생하지 않는다. 또한, 펄스 폭이 극도로 짧은 반면 첨두출력은 아주 높기 때문에 매우 높은 광세기인 물질 내에 다광자 흡수가 가능하게 하여 가공의 정밀성을 높일 뿐만 아니라 투명한 물질의 가공도 가능하게 한다. 이러한 특성덕분에 펄스 레이저를 이용하여 매우 많은 종류의 물질을 가공할 수 있다.

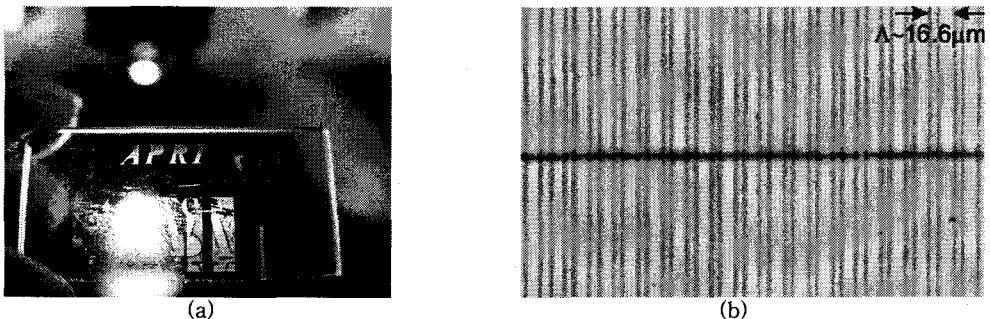


그림 1. 펄스 레이저를 이용한 유리 내부의 격자구조의 글자 가공결과(a), PPLN 내부의 도파로 가공 결과(b)

펄스 레이저를 이용한 미세광학은 미소 기계 장치의 제작에도 이용할 수 있고, 도파로, 3차원 광자 결정, 광 정보 저장 소자 같은 광통신 소자의 제작에도 이용할 수 있다. 이러한 특징 때문에 고정밀도의 미세구조 가공의 주도적인 기술로 자리 잡아 가고 있다. 그림 1은 고등광기술연구소의 펄스 레이저로

유리 내부에 주기적인 격자구조를 갖는 글자를 새긴 것(a)과 PPLN 내부에 광도파로를 새긴 것(b)을 보여주고 있다.

일반적으로 펄스 레이저의 발전기로부터 발생되어 나오는 광펄스는 수백 kW의 순간출력을 갖는다. CPA 방법이 개발됨으로써, 극초단 펄스레이저의 출력을 초고강도로 증폭할 수 있게 되었다. 현재 CPA방법으로 증폭단을 순차적으로 구성하면 광펄스의 출력을 Petawatt 수준까지 증폭할 수 있다. 이와 같은 초고강도의 광펄스를 렌즈와 거울 등을 이용하여 집중하면 10^{15} W/cm^2 이상의 매우 강력한 집중 강도를 얻을 수 있다. 이 경우, 레이저 전자장의 강도가 원자에 구속되어 있는 전자가 느끼는 전기장보다 커지므로, 고체나 기체 형태의 표적에 있는 원자가 급격히 이온화 된다. 구속전자의 행동에 의해 나타나는 일반적인 비선형효과와 달리, 이같이 강한 전기장 안에서는 자유전자의 행동에 의한 비선형효과들이 나타나서 고차 조화파 발생 등이 일어난다. 레이저 집중강도가 더 강해져서 레이저 전기장 안에서 진동하는 전자의 진동에너지가 정지에너지보다 커지면 상대론적 효과가 일어나기 시작한다. 레이저의 집중강도에 따라 해당되는 비선형효과의 영역이 달라지지만, 극초단 고출력 레이저와 표적의 상호작용에 의해 고에너지 X선과 입자(전자, 양성자, 이온 등)가 발생된다. 초고강도 레이저장을 플라즈마에 집중하면 공간전하효과가 일어나서 이들 사이에 강력한 전기장이 형성된다. 이때 형성되는 전기장은 GV/cm 이상의 가속 기율기를 가질 수 있으며, 이 전기장에 의해 전자를 가속하는 방법이 레이저 항적장 가속기이다. 이와 같이 전자가 레이저의 진행방향으로 가속되면 공간전하효과에 의해 강력한 전기장이 레이저의 진행방향으로 형성되므로, 양성자와 이온도 전자의 운동방향을 따라서 가속된다. 이때 가속되는 전자는 GeV, 양성자와 이온은 100 MeV 이상의 고에너지를 가질 수 있다.

이러한 펄스 레이저를 이용한 초강력장 과학 분야에 속하는 X선 레이저, 레이저 전자 가속기, 레이저 입자 가속기, 고출력 THz 선원 개발, 레이저 플라즈마 연구 등 다양한 연구개발이 세계 각국의 연구소에서 활발히 이루어지고 있다. 국내에서는 고등광기술연구소에서 페타와트급 고출력 펄스 레이저 시설인 “극초단 광양자빔 연구시설”을 2009년 완성을 목표로 구축하고 있다. 극초단 광양자빔 연구시설은 CPA 방법을 이용한 순차적 레이저 증폭단과 응용실험을 위한 반응 챔버, 다양한 저출력 펄스 레이저 시스템 및 2,500 평 규모의 고정정 전용 연구동 등으로 구성된다. 현재 100 TW 출력을 달성하였으며, 300 TW로 출력을 증강하고 있다. 최근 100 TW 펄스 레이저를 이용하여 2.4 MeV의 양성자빔 생성에 성공하였다.

III. 맺음말

펄스 레이저를 손쉽게 이용할 수 있게 됨에 따라, 기존에는 불가능 하였던 극초단의 시간영역을 탐구하고 이용하는 펄스 과학기술 분야의 연구가 매우 활성화 되고 있다. 펄스 과학기술은 새로운 학문 연구로서도 매우 큰 가치를 가지지만, 이를 이용한 극초단 계측장비 산업, 초정밀 가공 산업, 정밀의료기기 산업 등에 대한 산업적 응용도 매우 빠르게 진행되고 있다.

현재 국내에서는 대학들을 중심으로 저출력의 펄스 과학기술 관련 분야 연구들을 수행하고 있다. 또한, 고등광기술연구소에 “극초단 광양자빔 연구시설”이 구축됨으로써 고출력 분야 연구를 위한 기반 시설이 갖추어지고 있다. 현재까지 구축된 고등광기술연구소의 “극초단 광양자빔 연구시설”을 이용한 X선 레이저, 극초단 전자빔, 극초단 양성자빔, 중성자 등 2차 선원 발생 및 응용 분야의 연구도 활성화 되고 있다.

펄스 과학기술 분야는 선진국에서도 본격적인 연구가 시작된 지 오래지 않았기 때문에, 우리나라에서도 연구기반 시설이 구축되고, 본격적인 펄스 과학기술 연구가 이루어짐에 따라 이 분야의 핵심원천 기술 확보가 가능할 것으로 전망된다.