

결맞는 X선 연구단 소개

남 창 희

한국과학기술원 물리학과

chnam@mail.kaist.ac.kr

1. 개 요

결맞는 X선 연구단(Coherent X-ray Research Center)은 아직까지 실용적인 결맞는 광원이 존재하지 않는 극자외선 및 X선 영역에서 결맞는 광원 개발을 목표로 하여 1999년 과학기술부에서 지원하는 창의적연구진흥사업의 하나로 설립되었다. 기존의 광원에 비해 단색성, 집속성, 결맞음성 등의 우수한 특성을 가지고 있는 레이저는 현재 과학기술분야뿐만 아니라 일상생활에까지 널리 사용되어 결맞는 광원의 유용성을 입증되었다. 그러나, 극자외선과 X선 영역에서는 아직까지 실용적인 레이저가 개발되지 못하였고, 연구용으로 사용되는 X선 광원인 싱크로트론은 결맞음성이 있는 X선을 만들 수는 있으나, 싱크로트론이 대규모, 고가의 장비이기 때문에 이를 쉽게 이용할 수 없는 문제점이 있다. 결맞는 X선 연구단은 고출력 펄초 레이저를 이용한 고차조화파 발생이라는 새로운 접근 방법을 통해서 결맞는 X선 광원 개발에 도전하고 있다.

결맞는 X선 연구단은 한국과학기술원 물리학과의 극초단 레이저 연구실을 주축으로 설립되었다. 극초단 레이저 연구실은 1989년부터 고출력 레이저와 물질과의 상호작용을 연구해온 연구실로서, 극초단 고출력 레이저, 극자외선 및 X선 분광기 등을 개발, 연구해 왔으며 이를 기반으로 고출력 레이저에서 생성되는 초강력 전자기장 내에서의 원자 반응을 연구해왔다. 1997년, 국내 최초로 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저를 자체 개발하고 이를 이용한 고차조화파 발생을 통해 X선 영역의 광검출에 성공하면서 결맞는 X선 광원 개발의 가능성을 확인하였다. 연구단 결성 후, 현재까지 고출력 펨토초 레이저 개발, 고차조화파 발생 및 진단, 고차조화파의 이론적 고찰 등을 연구하고 있으며, 2명의 교수, 3명의 박사후 연구원, 5명의 박사과정 학생, 2명의 석사과정 학생 등이 연구에 참여하고 있다.

2. 연구 분야

고차조화파는 강한 레이저 펄스와 원자가 상호작용할 때 일어나는 일종의 비선형 광학 현상으로서 고출력의 레이저 펄스가 수십 차 혹은 수백 차의 X선 영역의 고차조화파로 파장변환되는 현상이다. 그 원리는 그림 1로부터 간략히 설명할 수 있다. 고출력 펄초 레이저 펄스에 의해 생성되는 강한 전기장은 원자핵과 전자 사이의 전기장만큼, 혹은 그 이상 강력하기 때문에, 원자의 포텐셜을 심하게 변형시켜서 전자가 터널링 현상에 의해 쉽게 이온화된다. 이온화된 전자는 고출력 레이저 펄스의 강력한 전기장에 의해 가속되어 운동 에너지를 얻으며, 레이저 펄스의 전기장 방향이 바뀌면 다시 되돌아오게 되어 원래의 원자와 충돌하여 합쳐진다. 주기적으로 진동하는 레이저 펄스의 전기장에 의해 이러한 이온화와 재결합의 과정이 주기적으로 일어나며, 전자가 원자와 재결합할 때 레이저의 전기장에 의해 전자가 얻은 운동에너지와 이온화 에너지의 합이 빛에너지로 방출되어 고차조화파를 생성한다. 원자와 전자의 이온화는 반전대칭성(inversion symmetry)을 가지기 때문에 그림 2와 같이 고출력 레이저 주파수의 홀수 배에 해당하는 고차조화파가 생성된다. 고차조화파는 X선 레이저와는 달리 차수에 따라 다양한 파장의 X선을 보다 쉽게 발생시킬 수 있고, 싱크로

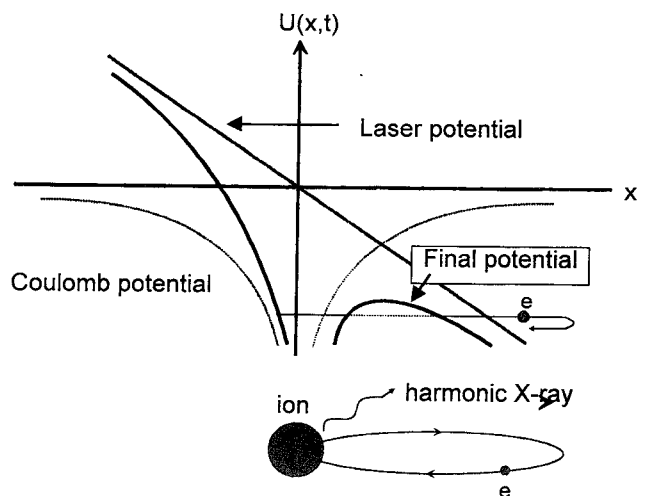


그림 1. 고차조화파 발생 원리.

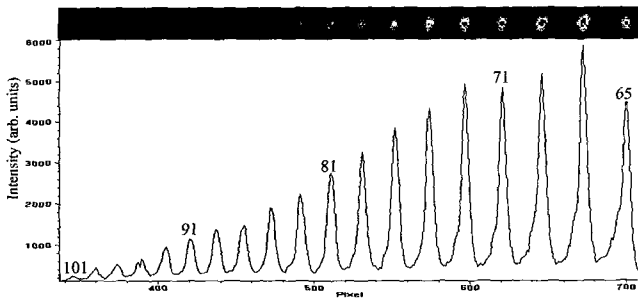


그림 2. 네온에서 발생한 고차조화파의 스펙트럼. 숫자는 조화파의 차수임.

트론에 비해 훨씬 저렴한 비용으로 실현 가능하기 때문에 최근에 걸맞는 X선 광원으로 주목받고 있다.

고차조화파를 연구하는 걸맞는 X선 연구단은 고차조화파를 이용하여 걸맞는 X선 광원을 개발하기 위해 다음과 같은 연구 주제를 가지고 있다.

가) 고출력 펨토초 레이저의 개발과 연구

고차조화파를 발생시키기 위해서는 레이저 펄스의 지속시간이 피코초, 혹은 펨토초로 매우 짧고, 첨두 출력이 테라와트 급으로 높은 극초단 고출력 레이저가 필수적이다. 1990년대에 들어서 커 렌즈 모드록킹과 같은 극초단 레이저 펄스 생성 기술, 티타늄 사파이어와 같은 우수한 이득 매질 개발, 극초단 레이저 펄스 증폭 기술인 chirped-pulse amplification(CPA)의 등장으로 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저 개발이 급속히 발전하였다. 이러한 고출력 펨토초 레이저는 극초단 레이저 연구실 초창기부터 주요한 연구 주제였으며, 걸맞는 X선 연구단 설립 후에도 보다 우수한 레이저의 개발 연구를 계속하고 있다.

고출력 펨토초 레이저는 펨토초 펄스 생성 및 증폭, 레이저 펄스의 시간적인 확대 및 압축 등 광범위한 레이저 기술을 필요로 하기 때문에 걸맞는 X선 연구단은 이들 전반에 걸친 다양한 연구를 하고 있다. 현재 20펨토초 3테라와트의 티타늄 사파이어 레이저를 개발, 운영하고 있으며, 보다 우수한 고출력 펨토초 레이저 개발을 위해, 넓은 스펙트럼과 높은 에너지를 갖는 펨토초 첨두 공진기 개발, 증폭된 자발방출(amplified spontaneous emission)과 이득에 의한 선폭축소(gain narrowing) 효과를 최소화 할 수 있는 우수한 펨토초 레이저 펄스 증폭 기술 개발, 효율적인 레이저 펄스의 확대 및 압축 등의 연구를 수행하고 있다. 최근에는 첨두 출력이 작는데 비해 평균출력이 높아서 실용성이 뛰어난 1 kHz의 고반복률로 동작하는 고출력 펨토초 티타늄 사파이어 레이저를 개발하고 있다.

고차조화파의 발생 효율 및 여러 가지 특성이 레이저 펄스의

미세한 변화에 따라 크게 달라진다는 것이 밝혀지면서, 극초단 고출력 레이저 펄스를 정확하게 진단하고, 능동적으로 레이저 펄스의 특성을 변화시킴으로써 고차조화파의 특성 향상을 꾀하고 있다. 이를 위해, FROG(frequency resolved optical gating), SPIDER(spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction) 등의 새로운 펄스 진단 방법을 도입하고 있으며, 변형거울(deformable mirror)을 쓰는 적응광학계(adaptive optics)를 이용하여 능동적인 레이저펄스 특성 조정도 연구하고 있다.

나) 고차조화파의 파장 가변

특정 파장에 고정된 X선 광원보다는 연속적으로 파장가변을 할 수 있는 X선 광원이 실용적인 면에서 훨씬 유리하기 때문에, 걸맞는 X선 연구단에서는 파장가변형 고차조화파 발생에 대해 연구하고 있다. 고차조화파는 전자의 이온화와 재결합이 레이저펄스의 진동주기에 맞추어 일어나고 반전대칭성(inversion symmetry)을 가지기 때문에, 레이저 주파수의 홀수 차수에 해당하는 주파수만을 갖는다. 그러나, 고출력 펨토초 레이저의 파장은 대부분 이득 매질에 따라 고정되어 조정이 까다롭기 때문에 고차조화파의 파장을 레이저 파장조절에 의해 변화하기가 쉽지 않다. 따라서, 실질적인 고차조화파의 파장가변을 위해서는 새로운 방법이 고안되어야 한다.

기존에 고차조화파에서 관측된 파장변화는 대부분 기체매질을 진행하면서 자기위상변조에 의해 청색변이된 극초단 고출력 레이저에 의해 유도된 것이었다. 즉, 극초단 고출력 레이저가 기체 매질을 진행하면서 청색변이되고 이에 의해 고차조화파의 파장이 청색변이 되는 방식이었다. 그러나, 이 방법은 기체의 밀도와 길이에 민감하고 레이저가 진행함에 따라 천천히 청색변이가 일어나서 고차조화파가 청색변이되는 양이 크지 않다.

걸맞는 X선 연구단은 펄스폭이 slowly-varying approximation을 적용할 수 없을 만큼 매우 짧아서 레이저의 전기장 크기가 한 주기 동안에도 급격히 변하는 펨토초 레이저 펄스를 사용함으로써 고차조화파의 파장을 조정할 수 있음을 입증하였다. 펨토초 레이저 펄스의 앞 단에서는 레이저의 전기장이 급격히 증가하기 때문에 전자가 원자에서 떨어져 나올 때에 비해 다시 재결합할 때의 전기장이 더 크고, 따라서 재결합이 더 빨리 일어난다. 즉, 레이저의 주기가 실제보다 더 짧아진 것처럼 작용하여 고차조화파가 청색변이되는 현상이 발생한다. 마찬가지로 펨토초 레이저 펄스의 뒷부분에서는 적색변이된 고차조화파가 발생해야 하나, 이 때는 대부분의 원자들이 완전히 이온화되어 고차조화파의 발생이 효율적이지 못하기 때문에, 실제

로는 청색변이된 고차조화파만 관측된다. 이러한 원리를 이용하면 레이저의 세기만을 간단히 조정하여 고차조화파의 청색변이 정도를 조정할 수 있기 때문에 비교적 쉽게 파장 가변이 가능하며, 현재까지, 수십 차 영역에서 고차조화파들 사이의 간격을 메울만큼 파장 가변에 성공하였다. 이 외에도 극초단 레이저 펄스의 위상 구조 조정에 의한 파장 가변 등 다양한 연구가 진행 중이다.

다) 고차조화파의 파장 영역 확장

고차조화파 현상이 발견된 후, 고차조화파를 사용하여 얼마나 짧은 파장의 X선을 생성할 수 있는가 하는 것이 주된 관심사였으며, 결맞는 X선 연구단의 중요한 연구 분야 중의 하나이다. 고차조화파의 차수는 고휘력 레이저에 의해 전자가 가속되어 얻는 운동에너지에 비례하여 늘어나므로 보다 짧은 파장의 고차조화파를 얻기 위해서는 기본적으로 더 강력한 레이저가 필요하다. 그러나, 레이저의 펄스폭이 길 경우에는 레이저의 최고 세기에 도달하기 전에 원자들이 모두 이온화 되기 때문에, 고차의 조화파를 얻기 위해서는 이온화가 되기 전에 원자들이 최고의 레이저 세기에 도달할 만큼 레이저 펄스폭이 짧아야 한다. 이를 위해 결맞는 X선 연구단에서는 10 펨토초 이하의 매우 짧은 레이저 펄스폭을 갖는 고휘력 티타늄 사파이어 레이저 개발을 연구하고 있다.

고차조화파의 차수는 레이저의 펄스폭과 출력뿐만이 아니라 기체 매질의 밀도, 길이, 레이저 펄스의 위상 구조 및 집속 위치 등에 따라 달라진다. 결맞는 X선 연구단은 20펨토초 3테라와트의 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 이에 대한 연구를 진행하고 있으며, 현재 헬륨 기체에서 약 40 Å, 즉 200차 영역의 고차조화파 발생에 성공하였다. 23 - 44 Å의 파장 영역은 탄소에 의해 흡수되나 물은 투과하여 의학, 생물학 분야에서 특히 유용한 파장 영역이기 때문에 40 Å 영역의 결맞는 고차조화파 발생은 중요한 의미가 있다. 앞으로 이 영역에 대한 고차조화파 연구가 결맞는 X선 연구단의 주요 연구분야의 하나가 될 것이다.

라) 고차조화파의 변환 효율 향상

고차조화파의 실질적인 응용을 위해서는 고차조화파의 출력이 충분히 높아야 하기 때문에, 극초단 고휘력 레이저에서 고차조화파로의 변환효율이 되도록 높아야 한다. 일반적으로 고차조화파에 사용되는 고휘력 레이저의 에너지는 수 mJ 영역이고, 수십차의 고차조화파의 경우 각 차수에 대한 변환 효율은 10^{-7} 이하이기 때문에, pJ 영역의 매우 약한 고차조화파가 생성된다. 결맞는 X선 연구단은 고차조화파의 변환효율을 높여서

nJ 이상의 차수당 에너지를 갖는 결맞는 X선 광원 개발을 연구하고 있다.

고차조화파의 변환효율을 높이기 위해서는 고휘력 레이저 펄스가 지나는 매질의 길이를 길게 해서 되도록 긴 영역에서 고차조화파 변환이 이루어지도록 해야 한다. 최근 6mm 길이의 기체 매질을 이용해 0.8mJ의 레이저를 써 약 1 nJ의 27차 조화파(29.3nm)를 발생시켜 변환효율이 10^{-6} 이상되는 결과를 얻었으며, 이를 더욱 개선시키기 위한 연구를 진행하고 있다.

라) 고차조화파의 이론적 이해와 기타 연구 분야

펨토초 고휘력 레이저가 1990년대 중반 본격적으로 등장한 이후, 이를 이용한 고차조화파 발생실험결과가 나오고, 이에 대한 이론적인 연구도 빠르게 이루어지고 있다. 결맞는 X선 연구단은 고차조화파의 발생 원리와 특성을 이론적으로 규명하고 실험결과와 비교, 분석하고 있다. 고휘력 펨토초 레이저와 원자가 상호작용하여 고차조화파가 발생하는 과정을 고전역학과 양자역학적인 방법으로 전산시뮬하여 고차조화파의 일반적인 특성을 설명하고 있으며, 고차조화파의 청색변이를 통한 파장가변, 고차조화파를 통해 생성할 수 있는 최대 파장 영역 등을 이론적으로 예측, 실험 결과와 비교하고 있다. 최근에는 긴 기체 매질을 극초단 고휘력 레이저 펄스가 진행할 때 발생하는 고차조화파의 특성 변화에 대해 중점적으로 연구하고 있다. 고차조화파 전산시뮬 결과는 보다 정확한 분석을 위해 고차조화파의 결맞는 합, 고차조화파의 시간-주파수 공간에서의 분석 등 새로운 방법을 고안, 적용하고 있다.

고차조화파는 결맞는 X선 광원으로서의 가능성 외에도 펨토초 이하의 매우 짧은 펄스폭을 가지는 초고속 시간 분해 광원으로서도 주목 받고 있다. 현재, 극초단 레이저 기술로 생성할 수 있는 가장 짧은 레이저 펄스폭은 커 렌즈 모드록킹된 티타늄 사파이어 레이저를 기반으로 한 약 5 펨토초이다. 그러나, 티타늄 사파이어는 근적외선 영역의 파장을 가지기 때문에, 5 펨토초동안의 레이저 전기장 진동 횟수가 불과 2회에 불과하여 더 이상의 짧은 레이저 펄스 생성은 어려운 실정이다. 고차조화파는 극자외선 및 X선 영역의 파장을 가지며, 기본적으로 고휘력 펨토초 레이저보다 짧은 시간 동안에만 생성되기 때문에 펨토초 이하의 펄스 생성도 가능하다. 이론적으로는 수십 아토초(10^{-18} s) 펄스도 생성 가능한 것으로 보고되고 있으며, 이에 대한 연구도 연구단에서 수행하고 있다.

3. 연구 장비 현황

고차조화파 연구를 하기 위해서는, 고차조화파 발생 매질인

기체 생성을 위한 기체 분사 장치 및 진공 용기, 고출력 펄스 레이저, 극자외선 및 X선 영역의 분광기 등의 장비가 필요하다. 걸맞는 X선 연구단은 다음과 같은 고차조화파 연구 장비를 개발, 보유하고 있다.

가) 10Hz 20펨토초 3테라와트 티타늄 사파이어 레이저

1997년 중반부터 가동하기 시작한 본 레이저 시스템은 고차조화파 발생 실험 전반에 걸쳐 다양하게 사용되고 있는 장비이다(그림 3). 최고 출력 3테라와트, 펄스 에너지 60mJ, 최소 레이저 펄스폭 20펨토초, 중심파장 820nm인 이 레이저 시스템은 두 개의 광학 테이블 위에 설치되어 있으며, 10Hz의 반복률로 동작한다. 극초단 펄스 증폭기술인 CPA 기술에 따라, 펄스폭 20펨토초 티타늄 사파이어 레이저 공진기, 펄스 확대기, 예비 증폭기, 주 증폭기, 펄스 압축기 등으로 구성되어 있으며, 레이저 공진기와 증폭기의 펌핑 레이저로는 연속발진 Nd:YVO₄ 레이저와 Q

스위칭된 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파를 사용한다.

나) 1 kHz 고출력 펄스폭 티타늄 사파이어 레이저

이 레이저 시스템은 1999년 말부터 개발하기 시작하였으며, 현재 거의 완성단계에 있는 장비로서, 10Hz 레이저 시스템에 비해 침투 출력은 작으나 1kHz의 고반복률로 동작하기 때문에 평균출력이 높아서 보다 실용적인 고차조화파 실험에 유용할 것으로 기대한다. 펄스당 에너지는 약 2mJ이며, 펄스폭은 현재 30펨토초이나 최적화된 최종 펄스폭은 약 20펨토초로 예상하여 0.1테라와트의 출력을 기대하고 있다. 본 레이저 시스템은 10Hz 레이저 시스템보다 소규모로서 한 개의 광학테이블에 설치되었으며, 높은 에너지의 극초단 펄스를 생성할 수 있는 긴 공진기 형태의 펄스폭 티타늄 사파이어 공진기를 사용하는 등 보다 진보된 형태의 고출력 레이저이다. 앞으로, 레이저 펄스폭을 압축하여 10펨토초 이하로 더욱 짧게 만들어서 고차조화

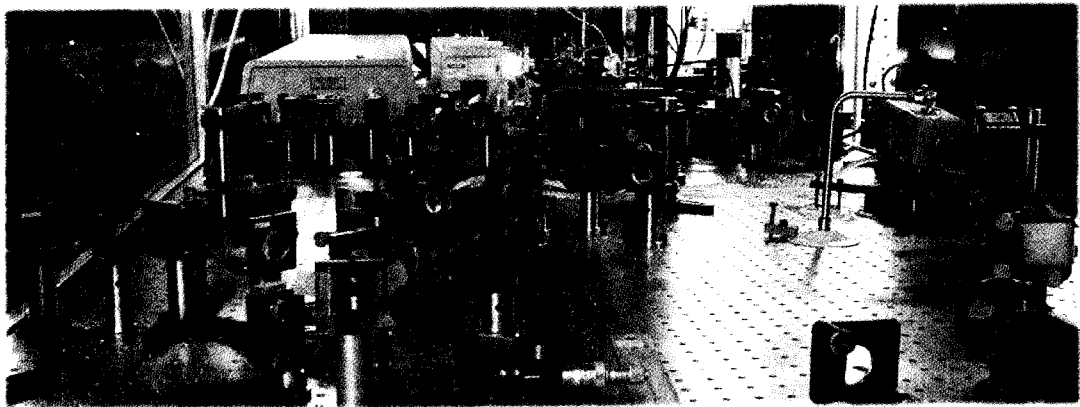


그림 3. 20 펨토초 3 테라와트 티타늄 사파이어 레이저 (10Hz).

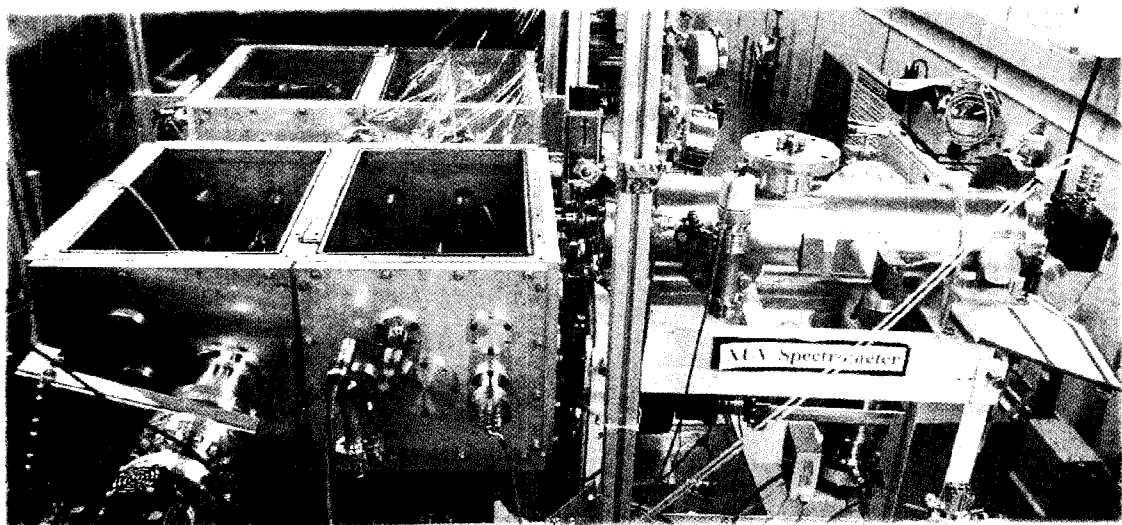


그림 4. 실험장치도: 보즈 응집물질.

파의 파장 영역확장과 변환효율 향상 등의 연구에 이용할 계획이다.

다) 고차조화파 발생용 진공 용기와 평면 결상형 극자외선 분광기

극자외선 및 연 X선 영역의 고차조화파는 공기중에서 쉽게 흡수되기 때문에, 모든 고차조화파 발생 실험은 진공 중에서도 행해져야 한다. 이를 위해 그림 4와 같은 진공 용기와 극자외선 분광기를 제작하여 고차조화파 발생 연구를 수행하고 있다. 진공 용기는 가로 75cm, 세로 55cm, 높이 35cm로 기체 매질을 분사하기 위한 기체 분사 장치와 극초단 레이저 펄스를 기체 매질에 집속하기 위한 평면거울과 집속 거울이 설치된다. 발생된 고차조화파를 진단하기 위하여 역시 진공 중에서 동작하는 평면 결상형 극자외선 분광기를 사용한다. 이 평면 결상형 극자외선 분광기는 토로이드 거울, 입사슬릿, grazing-incidence 오목 에돌이발, 계측기로 구성되어 있으며, 본 연구팀에서 자체 설계, 개발한 우수한 성능의 극자외선 분광기이다. 분광기는 30 ~ 400 Å 영역을 분광할 수 있으며, 평면 결상형이기 때문에 X선 CCD를 사용하여 편리하게 고차조화파를 분광,

진단할 수 있다.

4. 맺음말

고출력 펨토초 레이저 기술이 1990년대에 비약적인 발전을 하면서 세계적으로 이를 이용한 새로운 응용분야가 급속히 늘어나고 있으며, 고차조화파를 이용한 결맞는 X선 광원 개발도 이러한 최신 기술 중의 하나이다. 이러한 때에 결맞는 X선 연구단이 설립된 것은 최신 기술의 국내 자체 개발이라는 면에서 중요한 의미를 가진다. 결맞는 X선 광원 개발 연구는 레이저 기술의 집약이라 할 수 있는 고출력 펨토초 레이저와 이에 대한 원자의 반응이라 할 수 있는 고차조화파를 이용하는 것이기 때문에, 의학, 생물학 분야에 대한 직접적인 응용 가능성 외에도 광학 전반과 원자 물리 분야에 대한 파급효과가 크다. 특히, 최근 국내 광학 관련 연구들이 대부분 통신이나 반도체 광학에 치중되어 비선형 광학이나, 고전적 레이저 광학에 대한 연구가 상대적으로 부실한 것을 볼 때, 결맞는 X선 연구가 균형있는 광학 발전에 이바지하는 바 크다 하겠다.