

## 1. 서론

현대 산업 사회에서 레이저는 정보통신, 정밀 가공, 의료, 방위 산업 등에 광범위하게 사용되는 중요한 광원이다. 레이저는 우수한 결맞음성과 지향성 그리고 단색성을 가지고 있어 다양한 응용 분야를 창출하고 있다. 엑스선 레이저는 짧은 파장과 레이저와 같은 특성을 가지고 있어 많은 주목을 받고 있다. 초기의 엑스선 레이저는 매우 높은 펄핑 레이저를 필요로 하여 대형 레이저 시설에서 연구 되었으나, 제반 기술의 발전으로 최근에는 실험실 규모의 시설로도 엑스선 레이저를 발진할 수 있게 되었다. 엑스선 레이저는 극자외선(EUV)에서 연엑스선(Soft x-ray)에 이르는 파장 영역에서 발생하고, 결맞음성을 가지고 있어 나노 이미징, 엑스선 홀로그래피, 엑스선 분광학 등에 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 최

연구의 현황을 간략히 소개하려고 한다.

## 2. 엑스선 레이저의 개발

1960년대 레이저가 처음 개발되면서부터 엑스선 레이저의 개발에 대한 예측과 개발 노력이 시작되었다. 초기의 예측은 원자 내각 전자를 이온화(inner-shell ionization) 하여 일어나는 밀도 반전을 이용하여 엑스선 레이저를 개발하는 방법이었다. 그러나 이 방법은 강력한 엑스선 펄핑 광원과 제반 기술의 부재로 실현되지 못하였다. 엑스선 레이저는 1980년대에 들어와서 본격적으로 개발되기 시작하였다<sup>[1,2]</sup>. 엑스선 레이저는 고가의 이온으로 구성된 플라즈마에서 밀도 반전을 일으키기 위해 막대한 에너지가 필요하다. 이 때문에, 초기의 엑스선 레이저

# 특집 X-ray 광학

## 엑스선 레이저의 개발과 응용

김형택\*, 강현철\*

근 나노 과학 및 생체 과학의 발전으로 엑스선 광원의 중요성이 대두되고 있어 제 4세대 방사광 가속기인 자유 전자 레이저의 개발이 활발히 진행되고 있다. 엑스선 레이저는 대형 시설인 방사광 가속기 등을 이용한 엑스선 응용 연구를 실험실 수준에서 수행할 수 있는 방법을 제공할 수 있다.

최근 고등광기술연구소의 연구진은 100 테라와트급 광양자빔 시설을 이용하여 순은매질에서 발생하는 13.9 nm 파장의 엑스선 레이저와 크립톤과 제논 매질을 이용하여 32.8 nm와 41.8 nm 파장의 엑스선 레이저를 개발하는 데에 성공하였다. 또한 엑스선 레이저를 이용한 나노 이미징에 성공하여 주목을 받고 있다. 이 글에서는 엑스선 레이저 개발과 그 응용에 대해 소개하려고 한다. 또한 고등광기술연구소의 엑스선 레이저 개발 및 응용 기술

는 대형 레이저 시설을 이용하여 연구되었다. 엑스선 레이저는 초기의 내각 전자 이온화 방식이 아닌 충돌여기방식(collisional pumping scheme) 또는 재결합 방식(recombination scheme)을 이용하여 실현되었다. 1990년대 후반 순간 충돌 여기 방식(transient collisional pumping)의 엑스선 레이저가 개발되면서 엑스선 레이저에 필요한 펄핑 레이저는 획기적으로 줄어들게 되었다<sup>[3]</sup>. 최근에는 빗김각 입사 방식(Grazing Incidence pumping Scheme)<sup>[4]</sup>과 광학장 이온화(Optical Field Ionization) 방식<sup>[5]</sup>의 엑스선 레이저가 개발되면서 실험실 규모의 펄핑 레이저 시설로도 엑스선 레이저를 발진할 수 있게 되었다.

엑스선 레이저는 고가의 이온에서 형성되는 밀도 반전에 의해 발생한다. 엑스선 레이저는 짧은 밀도 반전 시간

\* 광주과학기술원 고등광기술연구소

과, 높은 재흡수율, 높은 펌핑 에너지로 인해 개발하는데 여러 가지 어려움이 있다. 특히 레이징에 필요한 펌핑 에너지가 파장의 4제곱에 반비례하여 증가하므로, 짧은 파장의 엑스선 레이저를 개발하기 위해서는 막대한 펌핑 에너지가 필요하다. 그래서 초기의 엑스선 레이저는 펄스당 kJ의 막대한 에너지를 가지는 레이저를 펌핑 광원으로 이용하여 발생시켰다. 그러나 극초단 레이저 펄스의 개발로 인해 순간 충돌 여기 방식의 엑스선 레이저를 개발할 수 있게 되었다. 순간 충돌 여기 방식의 엑스선 레이저는 나노초의 전단 펄스를 이용하여 플라즈마를 생성시키고, 강력한 피코초 레이저를 이용하여 밀도 반전을 일으켜 엑스선 레이저를 발진하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 엑스선 레이저 발진에 필요한 에너지를 수 J 단위까지 줄일 수 있다. 최근에는 순간 충돌 여기 방식에서 주펄스를 매질에 비스듬히 입사시켜 플라즈마 매질의 흡수율을 극대화시킨 빗김각 입사 방식(Grazing Incidence Pumping Scheme)을 이용하여 엑스선 레이저의 펌핑 에너지를 1 J 정도까지 줄이는 데에 성공하였다. 이로써 엑스선 레이저는 상용화된 탁상형 티타늄 사파이어 레이저 시스템으로도 발진할 수 있게 되었다.

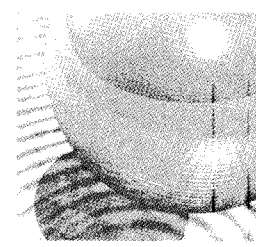
엑스선 레이저는 나노초 이하의 짧은 밀도 반전 시간으로 인해 공진기를 구성할 수 없다. 그래서 엑스선 레이저는 기본적으로 단일 통과(single-pass) 자가 증폭 발진(Amplified Spontaneous Emission)에 의해 발생한다. 이와 같이 자가 증폭 발진에 의해 발생하는 엑스선 레이저는 완전한 결맞음성을 가질 수 없고 빔의 공간적 분포도 불균일하다. 또한 엑스선 레이저는 편광이 정확히 규정되지 않는 상태로 발진하게 된다. 이와 같은 엑스선 레이저의 단점을 보완하기 위해 이중 통과(double-pass) 엑스선 레이저 및 이중 매질(double target) 엑스선 레이저 등의 방법이 개발되었다. 최근에는 결맞음성과 편광성이 좋은 고차조화파를 엑스선 레이저 증폭 매질에 입사하여 증폭시키는 고차조화파 주입 엑스선 레이저(Harmonic seeded x-ray laser)의 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 순은 매질에서 발생하는 13.9 nm 파장에서의 고차조화파 주입 엑스선 레이저의 개발은 Mo:Si 엑스선 거울의 높은 반사율을 이용할 수 있어, 각 엑스선 레이저 연구팀은 이를 개발하기 위해 노력하고 있다.

고등광기술연구소의 연구진은 최근 단일 펄스를 이용한 빗김각 입사 방식의 엑스선 레이저를 개발하는 데에

성공하였다<sup>6)</sup>. 기존의 빗김각 입사 엑스선 레이저는 수백 피코초 영역의 전단 펄스를 이용하여 플라즈마 매질을 만들어 준다. 주 펄스는 전단 펄스와 수백 피코초의 시간 지연을 두고 매질에 5°~25°의 빗김각(Grazing Angle)을 가지고 매질에 입사하게 된다. 이와 같이 주 펄스를 비스듬히 매질에 입사시켜 주면 주펄스가 플라즈마 매질을 지나가는 길이가 늘어나 주펄스의 흡수를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 빗김각 입사 방식을 사용하면 주펄스의 흡수를 최대화할 수 있어 1 J 정도의 펌핑 에너지로도 13 nm 파장 영역의 엑스선 레이저의 포화 발진이 가능하게 된다. 그러나 빗김각 입사 방식의 경우 30 μm 정도의 두께와 수 mm의 길이를 가지는 선집속을 사용하기 때문에 전단 펄스와 주펄스의 공간적 정렬이 매우 중요하다. 전단펄스와 주펄스의 정렬은 상당히 어려워져서 엑스선 레이저 발진이 불안정해지는 한 원인이 된다. 이와 같은 빗김각 입사 엑스선 레이저의 문제를 해결하는 방법이 바로 단일 펄스를 이용한 빗김각 입사 엑스선 레이저이다.

단일 펄스를 이용한 빗김각 입사 엑스선 레이저는 고등광기술연구소의 100TW 출력의 티타늄 사파이어 레이저 시스템을 이용하여 개발하였다. 100 TW 레이저 시스템의 최소 펄스폭은 32 fs 이지만, 엑스선 레이저 발진을 위해서 8 ps으로 펄스폭을 확대하였다. 엑스선 레이저 발진을 위해, 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 펌핑 레이저 펄스를 18°도의 빗김각으로 순은 매질에 입사시켰다. 순은 매질에서 발생하는 엑스선 레이저의 파장은 13.9 nm로, 발생된 엑스선 레이저는 극자외선 분광기를 이용하여 관측하였다. 단일 펄스 엑스선 레이저 개발을 위하여, 펌핑 펄스의 시간적인 모양을 100 TW 레이저 시스템의 증폭 과정의 주입 증폭 시간들을 조절하여 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 변화시켰다. 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 펄스 앞단의 에너지가 증가하면서 엑스선 레이저가 발진하고 매우 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 1(c)의 (i)에서 보여주는 펄스 모양을 이용하여 엑스선 레이저를 포화 발진시킬 수 있었다. 이와 같은 단일 펄스 빗김각 엑스선 레이징 방식을 이용하면 엑스선 레이저에 필요한 광학계를 매우 단순화할 수 있을 뿐만 아니라 엑스선 레이저의 출력도 안정화할 수 있다.

고등광기술연구소의 연구진은 순은 매질에서 발생하는 13.9 nm 파장의 엑스선 레이저 뿐만 아니라, 광학장이 이온화 방식을 이용한 엑스선 레이저 개발에도 성공하였다.



광학장 이온화 엑스선 레이저는 펨토초 고출력 레이저의 강력한 레이저 장을 이용하여 300 eV 이상의 고에너지 전자를 발생시켜 충돌 여기를 일으키는 엑스선 레이저이다. 이 때 레이저 장의 에너지를 전자에 효과적으로 전달하기 위해 원편광된 펌핑 레이저를 사용한다. 펨토초 레이저를 이용한 광학장 이온화 엑스선 레이저는 제논(Xe)과 크립톤(Kr)에서 순간 충돌 여기 방식의 광학장 이온화 엑스선 레이저가 포화 발전에 성공하면서 그 가능성이 주목받기 시작했다<sup>6)</sup>. 특히 광학 장 이온화 엑스선 레이저를 이용한 고차조화파 주입 엑스선 레이저가 개발되면서 고품질 엑스선 레이저 개발의 시초로써 많은 주목을 받았다<sup>7)</sup>. 이에 고등광기술연구소 연구진은 100 TW 광양자빔 레이저 시스템을 이용하여 발생시켰다. 제논과 크립톤에서 발생하는 엑스선 레이저의 경우 원형 편광된 극초단 고출력 레이저 펄스에 의해 8개의 이온 상태가 되고, 또한 레이저 장에 의해 가속된 전자가 제논과 크립톤 이온을 충돌 여기 시키면서 밀도 반전이 형성되어 발전한다. 본 실험에서는 0.8 J의 에너지와 30 fs의 펄스폭을 가진 원형 편광된 레이저 펄스를 40-50 Torr의 압력과 4 mm 길이의 크립톤이나 제논 매질에 집속하여 발전시켰

다. 그림 2에서 보는 바와 같이 제논의 경우 41.8 nm, 크립톤의 경우 32.8 nm의 엑스선 레이저가 발전한 것을 볼 수 있다. 이로써 고등광기술연구소의 연구진은 단일펄스 빗감각 입사 방식을 이용하여 은 매질에서 발생하는 13.9 nm의 엑스선 레이저 발전에 성공하였고, 제논과 크립톤을 이용한 32.8 nm와 41.8 nm 광학 장 이온화 엑스선 레이저 발전에 성공하였다. 이와 같은 엑스선 레이저 개발 연구는 엑스선 분광학, 엑스선 이미징 등의 다양한 응용 분야에 활용될 수 있을 것이라 기대되고 있다.

### 3. 엑스선 응용 기술 개발

#### 3.1 엑스선 나노 패터닝 기술

실험실 공간에 설치된 작은 규모의 레이저 시설을 이용하여 발생된, 펨토초의 시간 스케일을 갖는 강한 엑스선의 발생은 다양한 분야의 응용 연구를 활성화하였다. 대표적인 응용 연구의 사례로는 나노 패터닝, full-field 엑스선 현미경, 결맞은 엑스선 회절 영상 이미징 등이 있다.

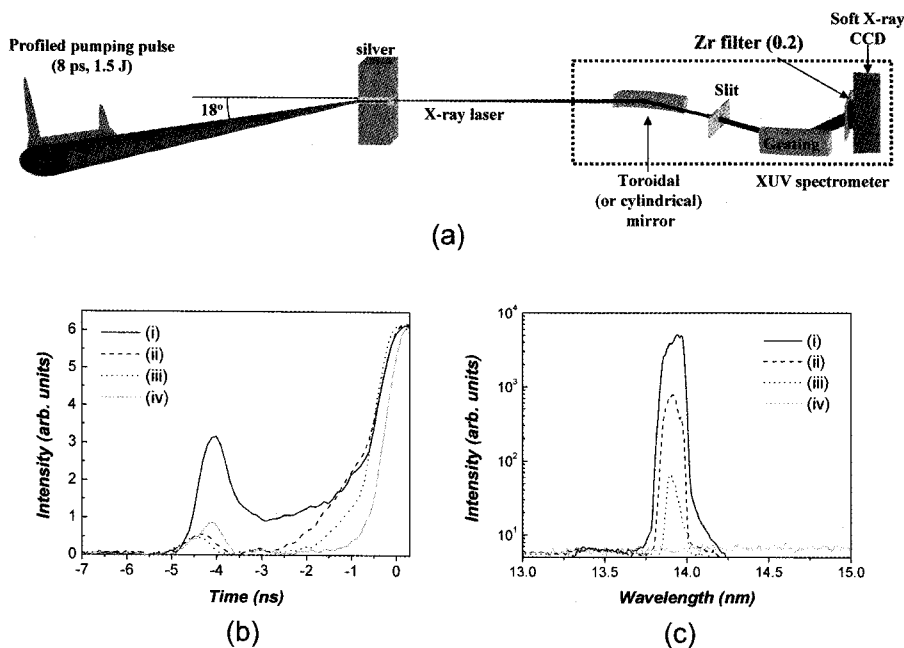


그림 1 (a) 단일 펄스를 이용한 빗감각 입사 엑스선 레이저 실험 개략도 (b) 펌핑 레이저 펄스의 시간 모양 변화 (c) 엑스선 레이저 신호의 변화

## 엑스선 레이저의 개발과 응용



그림 2 제논과 크립톤에서 발생한 광학장 이온화 엑스선 레이저 분광 이미지

나노 패터닝 기술은 엑스선 마스크를 이용하여 감광제를 직접 감광시키는 proximity 패터닝 기술과 다양한 광학계를 적용한 리소그래피 기술이 있다. 지난 2007년에 삼성전자는 광학적 리소그래피 기술을 변형하여 선폭 30 nm의 분해능을 갖는 반도체 소자를 제작함으로써 광학적 리소그래피의 커다란 진전을 제시하였다. 하지만 Rayleigh 가설에 의하면 광학적 리소그래피는 사용되는 광원의 파장 한계를 극복하기 어려울 것으로 예측된다. 따라서 새로운 광원이 필요로 하게 되었는데, 대표적으로 13.5 nm의 파장을 갖는 연 엑스선 혹은 EUV이다. 본 특집호의 원고에서도 알 수 있듯이 현재까지는 싱크로트론(방사광가속기)에서 발생한 13.5 nm의 광원을 이용하여 다양한 리소그래피 기술이 연구되고 있다. 또 다른 대안으로 떠오르는 광원이 바로 실험실 규모의 레이저를 이용하여 발생시킨 연 엑스선 레이저이다. 연 엑스선 레이저는 결맞음성이 매우 우수하고 펄스당 엑스선 photon의 수, 즉 휘도 또한 방사광가속기를 이용하여 발생한 엑스선에 비해 손색이 없다.(고등광기술연구소에서 은 매질을 이용하여 발생시킨 13.9 nm의 파장을 갖는 결맞는 엑스선 레이저의 photon의 수는  $\sim 10^{11}$  photons/pulse이다.) 국내에서는 레이저를 이용하여 발생시킨 연 엑스선 레이저의 응용 연구가 시작 단계이기 때문에 아직 구체적인 나노 패터닝 관련 연구 성과는 나타나 있지 않다. 하지만 고등광기술연구소에서 건설 중인 PW 레이저 시설이 완공되면 엑스선 레이저의 파장 대역도 물투과창(2-4 nm의 파장영역)까지 확대될 수 있을 뿐만 아니라 휘도 또한 크게 증가할 것으로 기대된다.

레이저를 이용하여 발생시킨 엑스선 레이저의 응용 연구의 사례로 Lloyd mirror를 이용하여 엑스선 빔을 간섭시켜 나온 회절 무늬를 감광제에 감광시키는 나노 패터닝

연구가 있다. 이 연구는 미국의 콜로라도 주립대학의 Rocca 교수팀에서 행해졌는데, Ne-like Ar table-top capillary discharge 레이저를 이용하여 발생한 46.9 nm의 파장을 갖는 엑스선 레이저를 이용하였다<sup>8)</sup>. Lloyd mirror는 두개의 다른 configuration을 갖는 평평한 mirror인데, 이 mirror를 통과하여 엑스선 레이저는 회절하여 서로 다른 방향으로 진행하는데, 이 두 빔이 만났을 때, 간섭 현상을 일으켜서 그림 3에서 보는 바와 같이 간섭 무늬가 나타난다. 이때 간섭 무늬의 간격은 수십 나노미터 정도이다. 간섭 무늬의 간격은 사용된 엑스선 파장, 입사 빔의 각도, 그리고 Lloyd mirror의 구성에 따라 달라진다. 나노 리소그래피 연구의 해결해야 할 부분 중 하나는 바로 적당한 감광제를 개발하는 일이다. Rocca 교

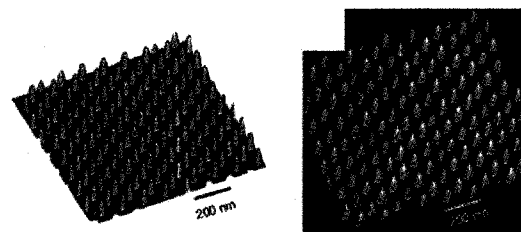
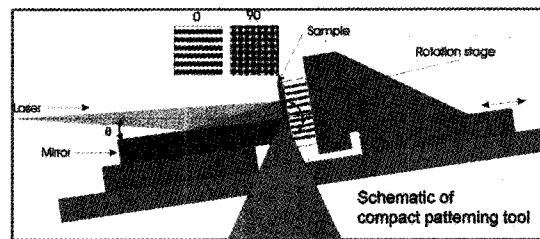
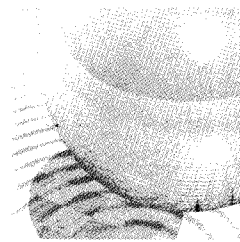


그림 3. Lloyd mirror를 이용한 간섭 패터닝 개략도, 계산된 나노 패터닝 형상, PMMA위에 Lloyd mirror를 이용하여 감광시킨 간섭 패터닝 AFM 형상.(8)



수팀은 PMMA를 기본적으로 이용하였으나 PMMA는 장시간 노출에 따른 감광 깊이나 분해능에 제한이 있다. 이를 위하여 HSQ(Hydrogen silses-quioxane)라는 감광제를 테스트하여 PMMA보다 우수한 결과를 도출하였다. 레이저를 이용하여 발생된 곁맞는 엑스선 레이저를 이용한 나노 패터닝 연구 결과 중 현재까지 보고된 가장 작은 크기는 60 nm의 원추형 나노 점이다. 또한 엑스선 레이저 빔을 프레넬 존 플레이트(Fresnel zone plate)를 이용하여 집속한 후 이를 감광제에 직접 노출하여 패터닝하는 ablation 기술도 Rocca 교수팀에서 개발되었는데, 현재까지는 3차 회절 초점을 이용하여 82 nm의 분해능을 달성하였다<sup>(9)</sup>. 이 기술은 사용된 존 플레이트의 최외각층 두께, 즉 존 플레이트의 분해능에 매우 크게 좌우된다. 전 세계적으로 연 엑스선용 존 플레이트는 Berkeley 연구소, Xradia 등에서 상용화하였는데, 현재 고등광기술연구소에서는 연 엑스선 프레넬 존 플레이트를 이용하여 나노미터 스케일 ablation 연구를 준비 중이다.

### 3.2. Full-field 엑스선 현미경

21세기 나노과학의 발전과 더불어 나노미터 크기의 구조체를 분석할 수 있는 엑스선 현미경에 대한 연구가 대단히 활발하게 진행되었다. 불과 5년여 전만 하더라도 마이크로미터 크기의 엑스선 초점을 구현할 수 있는 엑스선 집속 광학계가 주류를 이루었으나, 현재는 15 nm의 분해능을 가진 엑스선 현미경이 개발되었고, 향후 1-2년 내에 10 nm의 분해능을 가진 엑스선 현미경이 개발되리라 예측되고 있다.

Full-field 엑스선 현미경은 프레넬 존 플레이트, K-B mirror, compound refractive lens 등을 이용하여 빔을 집속하는 엑스선 집속 광학계에 의하여 그 분해능이 결정되는데, 이론적으로 1 nm 이하의 분해능이 가능하다고 보고되어 있다. 이러한 엑스선 나노 집속 광학계를 장착한 엑스선 현미경은 대부분 기존의 거대 제 3세대 방사광 가속기에서 시연되었다. 그러나 최근 미국, 일본, 유럽연합을 중심으로 극초단 레이저에 의하여 발생된 엑스선을 이용하여 실험실 크기의 탁상형 현미경 개발이 본격화 되었다. 국내에서는 본보의 특집호에서도 나와 있듯이 원광대학교의 윤권하 교수팀이 레이저 빔을 액화 질소에 타케팅하여 연 엑스선을 발생시킨 후 이를 광원으로 연 엑스선

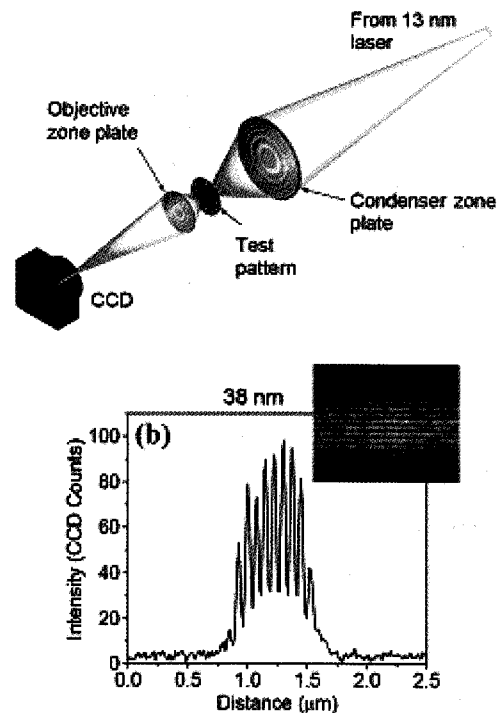


그림 4. (a) Full-field 연 엑스선 현미경의 개략도. Objective 존 플레이트의 분해능이 이미지 분해능을 결정한다. (b) 측정된 이미지와 line profile. 사용된 샘플은 multilayer section이다. 노출 시간은 20 초이다.<sup>(10)</sup>

현미경 장치를 개발하였다. 발생된 엑스선의 파장은 2.88 nm이고 측정된 이미지의 분해능은 약 45 nm이다. 현재까지 개발된 탁상형 연 엑스선 현미경의 가장 작은 분해능은 미국 콜로라도 주립대학의 Rocca 교수팀이 발표한 38 nm의 분해능이다<sup>(10)</sup>. (Berkeley 그룹의 15 nm 분해능을 지닌 연 엑스선 현미경은 Advanced Light Source에서 발생한 방사광을 이용하였다.) Rocca 교수팀은 5 Hz 반복률 레이저를 이용하여 13.9 nm(은 타겟) & 13.2 nm(카드뮴 타겟) 파장을 가지는 연 엑스선 레이저를 개발하였다. 연 엑스선 레이저는 band width가  $\lambda/\Delta\lambda < 1 \times 10^4$  정도로 잘 정렬된 단색광이기 때문에 chromatic aberration을 무시할 수 있다. 아울러 곁맞음이 우수할 뿐만 아니라 발생된 엑스선의 photon 수도 매우 크기 때문에 노출 시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 따라서 획득한 이미지의 신호대비소음도 또한 매우 우수하다.

고등광기술연구소는 국내에서 유일하게 100 TW 출력의 극초단 광양자빔 시설을 구축하고 있어, 이를 이용한

면 경 엑스선을 효과적으로 발생시킬 수 있다. 현재 고등광기술연구소의 연구진은 full-field 엑스선 현미경을 개발하고 있는데, 파장영역은 0.2 nm 이하이다. 연 엑스선 영역에서는 엑스선 에너지가 작기 때문에 시편을 얇게 가공해야 하는 불편함과 아울러 투과깊이의 제한이 있어 모든 시험 장치들이 진공 중에 설치되어야 한다. 하지만 경 엑스선 파장대의 엑스선을 사용하게 되면 이러한 문제점들을 최소화할 수 있다. 고등광기술연구소에서는 Cu K $\alpha$  파장의(파장=0.154 nm) 엑스선을 이용하여 실험실 크기의 탁상형 엑스선 현미경을 개발하고 있다. 집속 광학계는 3-5 mm의 지름을 갖는 프레넬 존 플레이트를 채택하였고, 최외각층의 두께는 약 400 nm이다. objective 렌즈는 최외각층의 두께가 50-100 nm를 가지는 프레넬 존 플레이트를 채택하여 50 nm 이하의 이미징을 계획하고 있다. 현재는 compressor 용 프레넬 존 플레이트를 확보하여 포항방사광가속기에서 테스트하였으며 10% 이상의 집속 효율을 획득하였다. 이 기술이 완성될 경우, 반도체, 디스플레이, 에너지, 바이오 산업 등 실제 응용에 사용되는 나노 스케일 구조체의 3차원 이미징이 가능할 것으로 기대된다.

### 3.3 결맞는 엑스선 회절 이미징

최근 엑스선 이미징 분야에서 가장 두드러진 발전을 이룩한 것은 결맞는 회절 영상 이미징(Coherent x-ray diffraction imaging) 기술이다. 엑스선 나노 집속 광학계에 의해서 분해능이 결정되는 full-field 엑스선 현미경과 달리 광학 소자를 사용하지 않고 엑스선의 회절 특성을 이용하기 때문에 사용된 엑스선원의 파장이 분해능을 결정하게 되어 원자스케일의 이미징이 가능할 것으로 예측되고 있다.(본 특집호 중 결맞는 엑스선 회절 영상 이미징 편에 자세한 내용이 기술되어 있다.) 지금까지는 방사광가속기에서 발생된 5~20  $\mu$ m의 결맞는 엑스선을 이용하여 회절 패턴을 얻은 후 이를 phase-retrieval algorithm을 이용하여 이미지를 획득하였다. 방사광가속기에서 발생한 결맞는 엑스선의 휘도는 약  $10^9$  photons/sec 정도이다.(APS의 undulator에서 발생된 20  $\mu$ m의 결맞는 엑스선 빔) 이러한 엑스선을 수초~수천 초 정도 노출하여야만 엑스선 회절 빔의 dynamic 영역을 충분히 확보할 수 있어서 분해능을 증가시킬 수 있다. 현

재까지의 분해능은 약 5 nm 정도이다.

최근 독일에 건설된 자유전자 엑스선 레이저 시설인 FLASH에서는 Chapman 등이 주도하여 단일 펄스 엑스선 회절 이미징에 성공하였다<sup>[11]</sup>. 사용된 엑스선 레이저의 파장은 32 nm이고 25 펨토초의 시간 스케일을 갖는다. 또한 펄스당  $10^{12}$  photons의 엑스선 레이저 휘도를 가진다. 획득한 이미징 분해능은 약 62 nm 이다. 또한 최근에 미국의 콜로라도 대학의 Murnane 교수팀에서는 탁상형 레이저 시설을 이용하여 결맞는 엑스선 회절 영상 이미징에 성공하였다<sup>[12]</sup>. 이 경우에는 발생한 엑스선 레이저 빔의 휘도가 낮아 약 5분 정도(300 pulses) 엑스선 빔을 노출하여야만 충분한 엑스선 회절 패턴을 얻을 수 있다. Ar 플라스마로부터 엑스선이 발생하기 때문에 파장은 46.9 nm이고, 획득한 이미징 분해능은 약 70 nm이다. 이와 같이 전 세계적으로 강한 결맞는 엑스선 빔을 발생시킬 수 있는 거대 과학 시설의 확보가 경쟁적으로 진행되고 있다. 다시 말하면 “제 4세대 광원”이 미래의 과학을 선도할 것으로 예측되기 때문이다. 국내에서는 그 중심에 고등광기술연구소가 있다.

고등광기술연구소에서는 은(Ag) 매질을 이용하여 13.9 nm 파장을 갖는 결맞는 엑스선 레이저를 발생하였고, 이를 이용하여 그림 5과 같이 단일 펄스 결맞는 엑스선 회절 영상 이미징에 성공하였다<sup>[13]</sup>. 엑스선 레이저의 휘도는 약  $10^{11}$  photons/pulse이고, 이 중 20  $\mu$ m의 field-of-view를 사용하였고, 시편에 노출된 엑스선 레이저의 휘도는 약  $10^9$  photons/pulse이다. 시편으로부터 115 mm 떨어진 곳에 CCD를 장착하여 시편으로부터 회절된 엑스선 빔을 측정하였다. CCD pixel 크기는 13.5  $\mu$ m x 13.5  $\mu$ m 이고 총 2048 x 2048 pixels이다. 샘플은 레이저 가공 기술을 이용하여 Ta foil에 9개의 마이크로미터 스케일 pinhole을 제작하였다. HIO phase-retrieval algorithm을 이용하여 이미지를 구현하였다. 실험실 스케일의 레이저 시설에서 발생시킨 단일 펄스 엑스선 레이저를 이용하여 결맞는 엑스선 회절 영상 이미징을 시연한 세계 최초의 결과이다. 현재 holography, pump-prove 기술 등 다양한 이미징 기법들이 시연되고 있다. 궁극적으로 물투과창 영역의 파장대를 갖는 엑스선 레이저를 개발하여 10 nm 분해능을 갖는 현미경 기술을 완성하는 것이다. 이를 이용하면 나노미터 스케일의 바이오 셀을 이미징할 수 있을 것으로 기대된다.

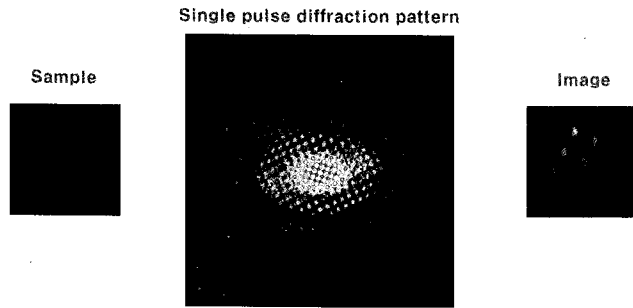
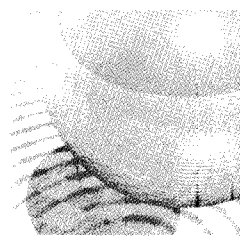


그림 5. 단일 펄스 결맞는 엑스선 회절 영상 이미징. 시편은 9개의 마이크로 스케일 pinhole이고, HIO phase-retrieval algorithm을 이용하여 이미징하였다. 이미지 분해능은 100 nm 이하를 달성하였으나, 여기에는 초기의 이미지를 싣기로 한다.(13)

#### 4. 결론


이상으로 엑스선 레이저의 개발과 응용 기술 개발, 그리고 고등광기술연구소의 관련 연구 현황을 살펴보았다. 엑스선 레이저는 짧은 파장과 결맞음성의 특성을 가지고 있어 향후 나노 기술, 생체 영상 기술 등에 다양하게 응용될 수 있을 것으로 예상되고 있다. 특히 엑스선 레이저는 20 nm 이하의 파장 영역에서 고차조화파 등의 광원에 비해 발생 출력이 높아 여러 가지 응용 분야에 적용할 수 있다. 또한 고등광기술연구소는 엑스선 레이저를 이용하여 Coherent X-ray Diffraction Imaging에 성공하여 엑스선 레이저가 나노 이미징에 이용될 수 있음을 증명하였다. 또한 연엑스선 매질 손상, 연엑스선 리소그래피, 엑스선 현미경 등의 응용 기술 개발 연구를 활발히 진행하고 있다. 극초단 고출력 레이저를 이용한 엑스선 레이저는 향후 3차원 나노 이미지 획득, 3차원 생체 영상 기술 개발에 사용될 수 있는 중요한 광원이 될 것으로 기대되고 있다.

#### 참고문헌


- (1) D. L. Matthews, et al., Phys. Rev. Lett. 54, 110 (1985).
- (2) S. Suckewer, et al. Phys. Rev. Lett. 55, 1753 (1985).
- (3) P. V. Nickles, et al. Phys. Rev. Lett. 78, 2748 (1997).
- (4) J. T. mmler et al., Phys. Rev. E 72, 037401 (2005); R. Keenan et al., Phys. Rev. Lett. 94, 103901 (2005); J. J. Rocca et al., Opt. Lett. 30, 2581 (2005).
- (5) S. Sebban et al., Phys. Rev. Lett. 89, 253901 (2002).
- (6) H. T. Kim et al, Phys. Rev. A in-press (2008).
- (7) Ph. Zeitoun et al., Nature 431, 426 (2004).
- (8) P. W. Wachulak et al. Optics Express 15, 3465 (2007).
- (9) G. Vaschenko et al. Optics Letters 31, 3615 (2006).
- (10) G. Vaschenko et al. Optics Letters 31, 1214 (2006).
- (11) H. N. Chapman et al. Nature Physics, 2 839 (2006).
- (12) R. Sandberg et al. Physical Review Letters 99, 098103 (2007).; R. Sandberg et al. PNAS 105, 24 (2008).
- (13) H. C. Kang et al. unpublished (2008).

---

**약 력**



**김형택**  
 학력  
 1995-1999 : 한국과학기술원 물리학과 학사  
 1999-2001 : 한국과학기술원 물리학과 석사  
 2001-2004 : 한국과학기술원 물리학과 박사  
 경력  
 2004-2005 : 한국과학기술원 물리학과 박사후연구원  
 2005-현재 : 광주과학기술원 고등광기술연구소  
 선임연구원



**강현철**  
 학력  
 1989-1995 : 한국과학기술원 재료공학과 학사  
 1996-1998 : 광주과학기술원 신소재공학과 석사  
 1998-2003 : 광주과학기술원 신소재공학과 박사  
 경력  
 2003.3-2003.5 : 광주과학기술원 신소재공학과  
 연구원  
 2003.6-2006.10 : Argonne National Laboratory,  
 Materials Science Division,  
 Postdoctoral appointee  
 2006.11-현재 : 광주과학기술원 고등광기술연구소,  
 선임연구원

---

12 권 | 호 광학과 기술 55