

# 4세대방사광가속기 진공시스템

나동현

## Vacuum system for PAL-XFEL

Donghyun Na

The Pohang Accelerator Laboratory X-ray Free Electron Laser (PAL-XFEL) is a 0.1 nm hard X-ray FEL which aims at providing photon flux higher than  $1 \times 10^{12}$  photons/pulse using a 10-GeV electron linac. The vacuum system of the machine consists of an injector section including an S-band photocathode RF gun, 10-GeV electron linac section based on S-band normal conducting accelerating structures and a 150-m long out-vacuum undulator system. We introduce the present status of PAL-XFEL vacuum systems.

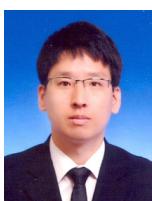
## 서론

포항가속기연구소의 4세대방사광가속기 (PAL-XFEL, Pohang Accelerator Laboratory X-ray Free Electron Laser)는 선형가속기에서 전자를 빛의 속도에 가깝게 가속시키고, N극과 S극의 영구자석이 교대로 설치되어 있는 삽입장치를 지나면서 자기장의 영향을 받아 경로가 교대로 구부러지는 곡선운동을 통하여 방사광을 발생시켜 원자, 분자 수준의 근원적 구조를 규명할 수 있는 첨단연구시설이다. 4세대 방사광은 3세대에 비하여 표1과 같이 1억 배 정도 더 빛의 세기가 높음을 보이고 있고, 펨토초 영역(1000조 분의 1초)의 시간 분해능을 가지고,

고 있다. 이러한 이유로 3세대에서는 구현하기 어려운 펌프-탐지(pump-probe)에 의한 화학반응 및 결맞음 회절 영상 등의 실험을 가능케 한다.

## 4세대방사광가속기의 개념

4세대방사광가속기는 전자빔을 만드는 장치로 광음극 전자총(photocathode electron gun)을 사용한다. 레이저 빔을 음극 표면에 가하면 전자총으로부터 전자빔이 발생되는데 이때 발생하는 전자빔의 품질은 가하는 레이저 빔의 크기, 길이를 포함한 펄스의 모양 등에 의해 결정된다. 음극으로부터 방출된 전자빔은 공간전하효과를 줄이기 위하여 수 MeV로 재빨리 가속되고, 이후 운동에너지가 135 MeV가 될 때까지 가속관을 통과한다. 이때 전자펄스의 길이는 3피코초 (1밀리미터) 정도이다. 펄스 길이를 4세대 방사광가속기에서 요구한 수준으로 더 줄이기 위하여 각각 4개의 이극전자석으로 구성된 두 개의 전자뭉치압축기(bunch compressor)가 설치되어 있다. 첫 번째 뭉치압축기는 420 MeV에, 두 번째는 2.84 GeV 위치에 있다. 이를 두 개의 뭉치압축기를 통과할 때 전자빔은 최종목표치인 100펨토초(30마이크론) 정도로 줄어든다. 이후 전자빔은 최종 에너지인 10.0 GeV까지 가속되는데 이 동안 뭉치의 길이는 유지되고 전자빔의 크기는 수십 마이크론 정도로 줄어든다. 선형가속기 전체의 길



〈저자 약력〉

나동현 연구원은 2006년 경북대학교에서 석사학위 후 (주)오이티, (주)디엠에스에서 영상증폭관 국산화 개발 업무를 수행하였고, 2012년부터 포항가속기연구소 4세대방사광가속기의 진공장치 담당자로 재직 중이다. (dhna3154@postech.ac.kr)

[Table.1] specification for accelerator

	3세대가속기	4세대가속기	비고(4세대 우월성)
빛의 세기	태양광의 100억배	3세대광원의 1억배	분석시간 단축 나노크기 실 관측
시간 분해능	피코초 영역 (100억 분의 1초)	펨토초 영역 (1000조 분의 1초)	원자, 분자의 화학결합과정 관측가능
공간 영역	수백나노 이상 영역	수 나노 이상 영역	
물리 분야	정적 현상 규명	동적 현상 규명	전자의 운동까지 관측
생명 분야	마이크로크기의 단백질분석	단분자 단백질 분석	시료의 결정 불필요 (획기적인 신약개발)
	냉동 시료 사용	살아있는 시료 분석	실시간 생명 현상 규명
반도체 분야	구조 설계	초고속 신물질 개발	새로운 차원의 디바이스개발
촉매 분야	정적 촉매현상 분석	동적 촉매현상 규명	고효율 신물질 개발
에너지 분야	정적 현상 분석	시공간 현상 규명 (광합성 반응, 광전지 현상규명)	고효율 신물질 개발

이는 550미터이다. 선형가속기를 나온 전자빔은 50미터 길이의 빔 전송선(beam transfer line)을 지나 삽입장치에 이르게 된다. 삽입장치의 길이는 총 100미터 정도이다. 삽입장치는 N극과 S극이 교대로 바뀌는 영구자석으로, 전자빔을 선형가속기에서 가속하여 삽입장치에 입사시키면, 이 전자빔은 삽입장치에서 자기장의 영향을 받아 경로가 교대로 구부러지는 곡선운동을 하며 방사광을 방출한다. 이때 발생하는 방사광을 자발방출(spontaneous emission)이라 부르기도 하는데, 방사광은 전자빔보다 조금 더 빨리 진행하므로, 방사광을 방출한 전자보다 앞에서 운동하는 전자들과 상호작용을 일으키게 된다. 이 과정에서 삽입장치에 의한 전자의 횡방향 운동과 방사광의 전기장이 서로 작용을 하며, 전자들 중 일부는 에너지를 얻고 또 일부는 잃기도 하여 그 결과 전자빔 뭉치는 진

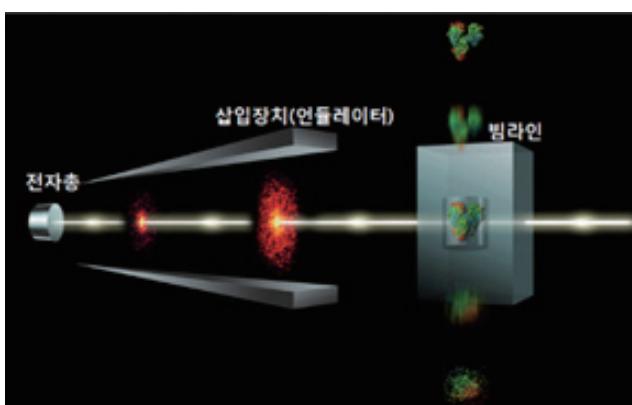
행방향으로 미세번칭(micro-bunching)이 된다. 이 미세번칭은 전자가 삽입장치를 통과하는 동안 서서히 진행되며 궁극적으로는 삽입장치의 주기, 자기장, 그리고 전자의 에너지에 의하여 결정되는 방사광의 기본파장 길이 내에서 이루어진다. 미세번칭이 된 전자빔으로부터 발생되는 방사광은 전자빔이 언듈레이터를 진행하는 동안 세기가 지수함수적으로 급격히 증가하는데 이와 같은 원리에 기본을 두는 방사광 가속기를 자체증폭자발방출 자유전자레이저 (줄여서 SASE FEL이라고 함)라 하며, 현재 건설 중이거나 제안되고 있는 차세대방사광가속기는 그림 1과 같이 모두 이러한 SASE FEL의 원리를 기본적으로 이용하고 있다.

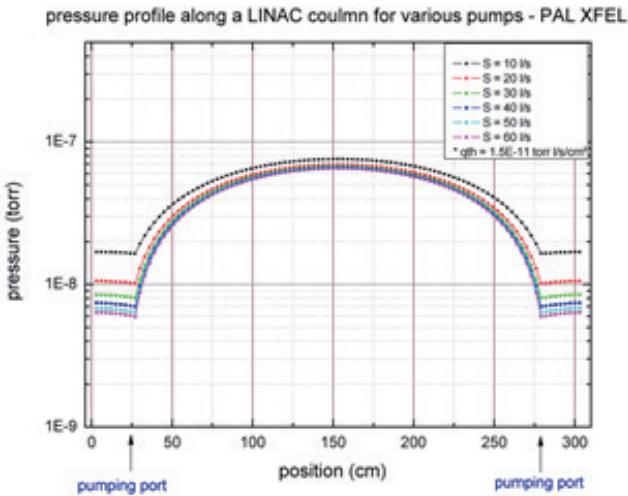
## 4세대방사광가속기 진공시스템

전자 빔을 가속 및 전송하는 과정에서 빔의 수명을 보장하고 빔 손실을 최소화하기 위해 고진공 혹은 초고진공은 필수적인 요소이다. 또한 빔 전송관(진공용기)의 재질, 내부 형태에 따라 wakefield가 발생하고 그로인한 빔 손실이 발생된다. 구간의 특성에 따라 요구진공도가  $10^{-11}$  mbar에서  $10^{-7}$  mbar 수준으로 요구되어지며, 이를 만족하기 위해 진공시스템 설계를 통해 진공펌프의 종류, 용량 및 수량의 결정과 배기의 최적화 설계를 하였다. PAL-XFEL 진공시스템은 이온펌프가 주 펌프로 설계되어 설치되어 있고 크게 3가지 범주로 구분 할 수 있다: (1) 입사기 구간, (2) 가속 구간, (3) 언듈레이터 구간이다.

입사기 구간은 전자총과 두 개의 가속관 그리고 S-BPM등 다양한 진단장치로 구성되어 있다. PAL-XFEL 전자원은 RF 광음극 전자총을 사용한다. 광음극 전자총의 수명은 진공도에 의해 강하게 영향을 받기 때문에 초고진공( $10^{-10}$  mbar 이하)을 유지하여야 한다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 광음극 배기 진공용기에는 비활성기체 및 메탄을 배기하기 위한 이온펌프와 초고진공에 영역에서 대부분을 차지하는 수소에 대한 배기성능이 탁월한 NEG펌프를 사용하였고, 진공용기는 stainless steel 표면에 VTO (Vacuum Thermal Oxidation) 처리를 통하여 기체방출률을 줄였다. 현재 빔 운전 중 진공도는  $5 \times 10^{-11}$  mbar를 유지하고 있다.

가속 구간 전체 진공시스템은 3.12 m 가속관 174개와 전체 길이가 대략 1000 m 정도의 wave guide로 구성되

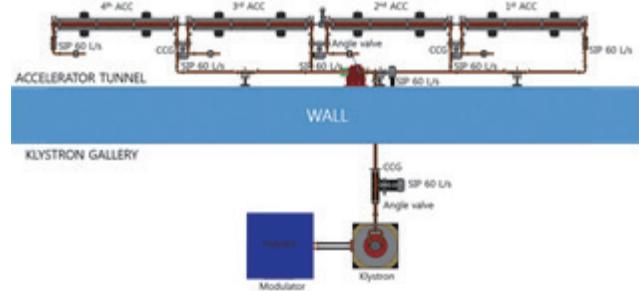
[Fig. 1] 4<sup>th</sup> Generation X-ray free electron laser



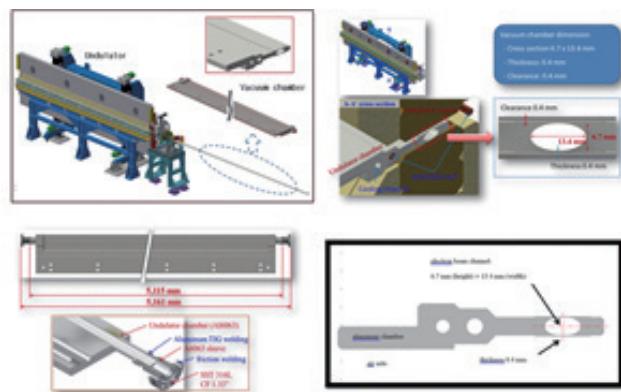
[Fig. 2] pressure profile of the accelerating column

어 있다. 가속관 1 module은 4개의 가속관과 25 m 길이의 wave guide로 구성되며, 각 구간 양단에 gate valve를 이용하여 독립적으로 배기할 수 있게 설계하였다. module별 진공도 계산은 기체방출률, 배기속도, 연결도 관의 크기등을 고려하여 작성하였다. 그림 2는 가속관 1 column에 대한 펌프 용량별 pressure profile을 나타내고 있다. 가속관 1 column은 OFHC cooper로 만든 80개의 cavity로 구성되어 있고 기체방출률은  $1.5 \times 10^{-11}$  mbar L/s를 적용하여 계산하였다. 내부 지름은 20 mm이며 길이는 3 m이다. column 양단에서의 effective pumping speed는 대략 17 L/s이다. 가속관은 내경이 작고 길이가 긴 형태이기 때문에 요구 진공도를 만족시키기 위해 local massive pumping이 아닌 distributed pumping 방법을 채택하여 설계하였다. 보다 균일한 진공도 분포를 유지하기 위해 small 이온펌프를 각 column 양단에 위치시켰으며, wave guide 양단에도 이온펌프를 위치시켰다. 그림 3은 가속 구간 1 module에 대한 진공시스템 설계를 보여주고 있다. RF conditioning 후 전체 가속 구간의 평균 진공도는  $10^{-9}$  mbar를 유지하고 있다.

가속관 1 module은 7개의 이온펌프(60 L/s)와 3개의 진공게이지로 구성되어 있다. 진공게이지는 진공 burst 시 최단시간 내 인접 진공장치를 보호하기 위하여 interlock response time이 빠른 Cold cathode gauge로 설계하였다. 각 module은 진공 실링부의 radiation resistance 값이 높은 all metal gate valve를 사용하였고, pneumatic type으로 설계하여 운전 중 open/close 상태를 항상 확



[Fig. 3] modeling for Regular module of vacuum system



[Fig. 4] Undulator vacuum chamber dimension

인 가능하며, remote로 작동할 수 있게 설치하였다.

언듈레이터 구간에 설치된 진공용기는 그림 4에서처럼 내경 6.7 mm, 길이 5 m, 두께 0.4 mm인 매우 얇고 긴 형태이다. 언둘레이터 구간을 지나는 전자빔은 잔류기체와의 충돌에 의해 빔 성능을 저하시키는 electron loss 등이 야기될 수 있다. 따라서 좁은 간격의 언둘레이터 진공용기를 지나는 전자의 진행을 용이하게 하기 위해서는 높은 내부 진공도와 매끄러운 내부 표면이 요구된다. 언둘레이터 진공용기의 요구 진공도는  $5 \times 10^{-7}$  mbar이하이며, 내부 표면 거칠기는 150 nm이하이다. 언둘레이터 진공용기는 wakefield를 최소화하기 위하여 electrical conductivity가 좋고, 내부 표면이 매끄러워야하며 산화막 두께가 매우 얕아야 한다. 따라서 진공용기는 낮은 AC electrical resistivity를 가지는 알루미늄 6063을 이용하여 제작하였다. 알루미늄 진공용기는 요구사양인 표면 거칠기 150 nm이하, 산화막 두께 5 nm이하를 만족시키기 위하여 특수압출, 초정밀 기계가공, 화학연마등의 기술을 포함가속기 진공그룹에서 자체 개발하여 제작 공정에 적용하였다.

## 맺음말

포항가속기연구소의 4세대방사광가속기는 2016년 건설을 완료하였고, 2017년 세계 3번째로 X선 FEL 개발을 성공하였다. 현재 시운전을 성공적으로 마쳤으며, 금년 4월부터 본격적으로 이용자에게 빔을 제공할 예정이다.

4세대방사광가속기에 설치된 모든 진공용기는 순수 국내 업체에서 설계 및 제작하여 국내 기반기술의 발전에 크게 이바지하였다. 진공시스템은 가속기를 구성하는 가장 핵심중 하나이고, 공기와 같이 필수불가결한 역할을 하고 있다. 진공시스템의 가장 중요한 목적은 전자빔 에너지의 수명을 보장하고 빔 손실을 최소화하는 것이다. 각 구간별로 도출된 요구진공도를 만족하기 위해 구간별 진공시스템의 특성을 철저히 분석하여 설계를 진행하였다. 향후 진공시스템에 대한 체계적인 예방정비와 추가 진공장치 업그레이드를 통하여 사용자들에게 보다 안정적인 빔을 제공 할 계획이다.

## References

- [1] PAL-XFEL Technical Design Report, PAL (2013)
- [2] M. Yoon, D.-E. Kim, I. Hwang and E.-S. Kim, J. Korean Phys. Soc. 54, 1942 (2009)
- [3] <http://pal.postech.ac.kr/>.