



포항가속기연구소 진공연구실

하태균

포항가속기연구소 진공연구실은 포항방사광가속기(PLS-II)에 설치된 거대 진공 장치의 운영 및 성능향상 그리고 초/극고진공기반기술 개발을 수행하고 있으며, 4세대 방사광 가속기(PAL-XFEL) 진공장치의 설계 및 제작도 병행하고 있다. 대형 초고진공 장치의 진공 재료 및 복합 배기에 대한 축적된 경험을 바탕으로 진공기술의 한계 극복과 더불어 사용의 용이성도 함께 추구하는 한편 최근에는 정밀장치의 안정성 공학(stability engineering) 분야도 관심을 기울이고 있다. 앞으로 초/극고진공 기반기술에 대한 선도적인 연구와, 전 세계 가속기 진공 전문가들과의 교류 확대를 통해 국제적인 진공그룹으로 발돋움 하고자 노력하고 있다.



[Fig. 1] 포항가속기연구소 전경

1994년에 건설된 포항방사광가속기(Pohang Light Source; PLS)는 빛의 속도로 가속된 전자를 원형 궤도에 저장하면서 전자가 휘 때 발생하는 강한 빛, 특히 자외선과 X-선을 이용하여 물질의 구조를 탐구하는 일종의 대형 과학실험 장치이다. 한번 저장된 전자빔이 흘러 지지 않고 오랫동안 돌면서 빛을 제공하려면 전자가 지나는 길에 진행을 방해하는 입자의 수가 적어야 한다. 예를 들어 전자빔의 수명을 10 시간 이상 유지하기 위해서는 저장링의 압력을 10^{-9} mbar 이하인 초고진공으로 유지해야 한다.

길이가 280 m인 저장링 전체를 초고진공으로 유지하기 위해서는 진공 시스템의 설계에서부터 재료의 선택, 가공, 용접, 세척, 조립 등의 전체 제작 공정이 초고진공에 부합하는 기술로 이루어져야할 뿐만 아니라 조립 및 진공 배기에도 세심한 주의가 필요하다. 초창기만 하더라도 우리나라에 정밀 가공 및 초고진공 기술이 발전되지 않아서 진공 시스템의 제작에 많은 어려움이 있었으나, 지난 20여 년간 PLS의 발전과 함께 국내 진공 업체의 초고진공 기술도 발전하였다.

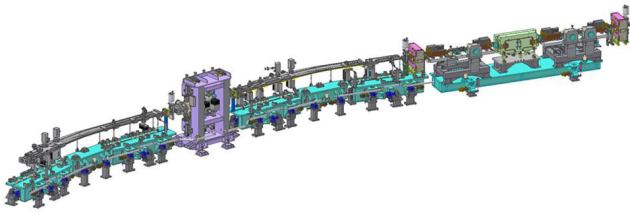
PLS 진공시스템의 저장링 주 진공용기는 알루미늄 합금으로 제작되었고, 벨로우즈를 포함한 연결부품 및 광자막이 등에는 스테인레스강, 무산소동, 동합금 및 세라믹을 비롯한 다양한 초고진공 재료가 사용되었다. 진공 펌프는 이온펌프와 비증발성 게터펌프의 조합으로 이루어졌으며 진공도의 측정은 B-A gauge를 사용하였다. 새로운 장치 설치 등의 필요에 의해 진공 시스템이 공기에 노출되었을 때는 100℃ 정도의 뜨거운 물을 챔버의 냉각 채널에 흘려주어 가열탈기체 처리할 수 있도록 설계되었다.

PLS는 전자빔 에너지 2.5 GeV 및 빔전류 200 mA로 운전되다가 2009년에 이들을 각각 3 GeV, 400 mA로



〈저자 약력〉

2009년 포스텍에서 물리학과 박사학위를 받았으며, 2010년부터 포항가속기연구소에 근무하였고, 2013년부터 동 연구소의 가속기운영부 기계진공자석팀장으로 재직 중이다. (hatae@postech.ac.kr)

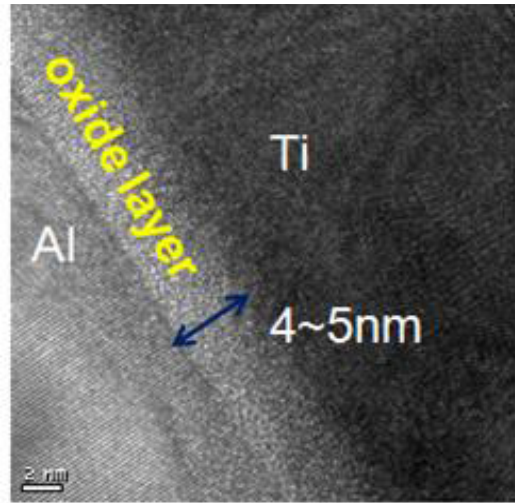


[Fig. 2] 저장링 진공장치의 설계

높이는 것을 주요 골자로 하는 성능향상사업(PLS-II)이 착수되었다. 비슷한 시기에 새로 건설되는 전 세계 방사광 가속기들은 둘레가 500 m 이상으로 넉넉한데 비해, PLS-II는 기존의 건물을 그대로 활용하기 때문에 저장링 둘레가 280 m로 제한된다는 제약이 있었다. 이 사업을 성공시키기 위해 진공그룹이 직면한 문제는 초고진공을 유지하면서 같은 둘레의 저장링에 더 세고 강해진 전자빔을 견딜 수 있도록 진공시스템을 구축해야 한다는 것이었다. 전자석과 삽입장치 및 각종 진단 장치에 할당된 공간을 피해 진공장치를 설치해야 하기 때문에 빔물리 및 진단 그룹과의 여러 번에 걸친 조율 끝에 진공시스템의 설계가 확정되었다.

빔라인 실험용으로 제공되는 극히 일부분을 제외한 나머지 빛은 진공시스템에서 흡수해야 하는데, PLS-II의 전자빔에서 방출되는 빛의 출력은 417 kW로 PLS의 110 kW 보다 약 4배나 증가하므로 더 견고한 광자막이 (photon absorber)의 설계가 요구되었다. 광자막의 수명은 20년 이상이 요구되는데 열피로에 의한 균열 발생을 최대한 억제해야 한다. 재료는 냉간 단조하여 기계적 강도를 높인 무산소동을 선택하였다. 무산소동 몸체와 스테인레스강 플랜지 사이의 이종접합을 위해 브레이징 대신 전자빔 용접법을 사용하여 무산소동 몸체의 고온노출을 최대한 억제함으로써 기계적 강도를 유지할 수 있었다.

한편 전자빔이 발생시키는 전자기파는 주변의 금속 진공용기 표면과 상호작용하면서 다시 전자빔에 영향을 주는 웨이크필드(wake field) 효과를 미친다. 이 때 진공용기 단면에 급격한 변화가 있으면 웨이크필드 효과가 커져 전자빔의 질을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 고주파 전자기파의 트랩에 의한 열로 인해 진공용기가 녹는 일이 벌어질 수 있다. 이러한 효과를 최소화하기 위해 진공용기의 단면은 되도록 일정하게 유지되어야 한다. 그런

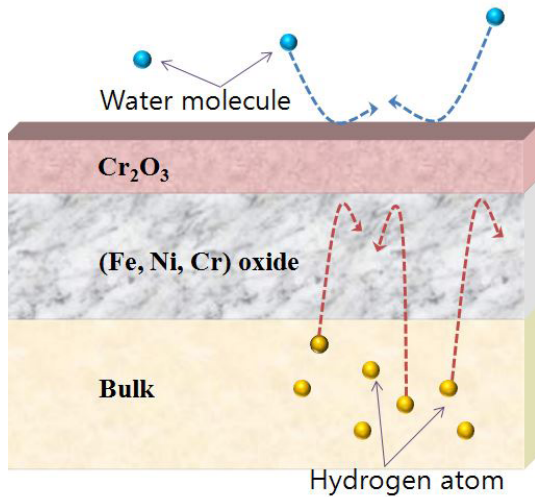


[Fig. 3] 5 m 진공용기의 표면 산화막 분석(TEM)

데 가속기와 같은 대형 진공 시스템을 조립하기 위해서 주름관(bellows)의 사용이 불가피하므로, 내부에 전자빔에 의한 고주파장을 차폐하고 단면을 일정하게 유지하기 위한 금속막이 설치된 특수한 주름관을 개발하여 사용한다.

2011년 착수하여 한창 건설이 진행 중인 4세대 가속기(PAL-XFEL)의 언듈레이터 진공용기에서는 웨이크필드 효과가 극대화된다. 내경이 10 mm 이하로 매우 좁고 길이는 5 m 이상으로 긴 진공용기가 약 20개 설치되기 때문이다. 웨이크필드 효과를 최소화하기 위해 진공용기 내부의 표면은 매끄럽고 얇은 산화막이 형성되어야 한다. 알루미늄합금을 압출하여 진공용기를 만들어야 하는데 전국의 압출업체를 수소문한 끝에 2개 업체에서 공동 개발을 시도해보자는 긍정적인 답변을 얻었다. 2년이 넘는 노력 끝에 진공용기의 모양을 만드는 압출 과정에서부터 내부 표면의 공기 접촉을 차단하여 양질의 표면을 형성시키는 특수 압출과 표면 연마 및 정밀 가공, 그리고 화학 세척으로 마무리하는 제작 공정을 완성하였다. 그림 3은 언듈레이터 진공용기의 표면을 분석한 TEM 사진이다.

전자빔 궤도를 안정시켜 양질의 빛을 제공하기 위해서는 진공 시스템의 정확한 제작 및 설치뿐만 아니라 운전 중 장치의 기계적 안정성 유지도 중요하다. 지반 변화에 의한 저장링 내부의 부분적 장기 표류의 영향을 측정하기 위해 HLS(Hydrostatic Leveling System) 분석을 시도하고 있으며, 민감한 장치에 가해지는 진동의 영향



[Fig. 4] VTO 처리로 고품질 크롬산화막 형성된 스테인레스강

을 평가하기 위해 진동 스펙트럼 분석도 진행하고 있다. 진공 기반 기술 분야는 금속 진공 재료의 표면 처리에 의한 기체방출 저감 기법, 조합 펌프의 배기 성능 최적화, 화학연마 처리 기법, 극고진공 시스템 개발 등의 연구를 수행하고 있다. 특히 일반 배관 용 스테인레스강 용기 표면에 고품질의 크롬산화막을 형성시키는 VTO(Vacuum Thermal Oxidation) 기법과 스퍼터이온펌프-NEG 조합펌프를 적용하여 낮은 10^{-12} mbar의 극고진공을 구현하는데 성공하였고, 연강의 초고진공용 재료로의 활용 가능성을 확인하는 등 실용적이면서도 극한을 추구하는 연구를 진행하고 있다. 이러한 기술



[Fig. 5] 포항가속기연구소 진공그룹 멤버 및 국제 자문 위원들 사진

들은 향후 차세대 전자총 개발, 전자현미경, 정밀 표면 분석 장치, 핵융합 원료 저장 용기, 반도체/디스플레이 산업 등 다양한 분야에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

앞에서 기술한대로 포항가속기연구소 진공그룹은 대형 진공 시스템의 설계, 제작, 표면처리 및 안정성 공학 등의 다양한 분야를 다루고 있다. 앞으로 국가 주도의 대형 연구 시설의 건설이 줄줄이 예정되어 있고, 산업계에서도 점차 높은 수준의 진공 기술의 필요성이 부각되는 등 이 분야 전문가에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 기대된다. 초/극고진공 공학, 진공재료, 표면처리, 안정성 공학 등에서 기술적 한계를 극복하고 극한의 영역을 탐구하는데 열정적인 분들의 많은 관심 바란다.