

포항가속기연구소와 제4세대 방사광가속기

최진혁

포항가속기연구소, 포항 790-784

(2006년 10월 27일 받음)

포항가속기연구소가 1994년에 완공한 제3세대 방사광가속기는 방사광을 만들어내어 실험에 이용하는 시설로써 전자를 2.5 GeV까지 가속시키는 선형가속기와 이 전자를 저장하여 회전시키면서 방사광을 발생시키는 원주 280 m의 저장링으로 되어 있다. 현재 저장링에 27개의 빔라인 시설이 설치되어 실험을 수행 중에 있다. 또한 포항가속기연구소는 차세대 방사광 발생장치인 제4세대 방사광가속기 건설 계획을 추진 중에 있다. 이 논문에서는 현재 가동 중인 방사광가속기의 현황과 4세대 가속기의 건설 추진 현황에 대해 설명하고자 한다.

주제어 : 포항가속기연구소, 제4세대 방사광가속기

I. 포항가속기연구소

입자물리 실험용 전자가속기에서 나오는 방사광을 실험에 응용하기 시작한 1970년대의 1세대 방사광가속기 이후 방사광의 효용에 대한 인식의 확대로 세계 도처에 2,3 세대의 방사광가속기가 건설되었으며 그 사용자도 약 2만 명에 이르게 되었다. 최첨단의 저장링형 방사광가속기는 이전의 방법에 비해 최소 수천만 배 더 밝은 빛을 발생하고 또한 이전 장치로는 불가능했던 특성을 갖게 할 수도 있게 되었다.

1988년 포항공대에 가속기 건설 추진본부를 설립함으로써 본격적으로 가동을 시작한 포항 방사광가속기 건설 사업은 1991년 4월 1일 건물착공에 들어가 1994년 7월 선형가속기 저장링, 그리고 X-선 산란 빔라인 1기와 자외선 빔라인 1기의 건설을 완료하였다. 이후 시운전을 성공적으로 마친 1994년 12월 7일 포항 방사광 가속기의 건설 완료를 선언하게 되었다.

포항 방사광가속기는 에너지가 2.5 GeV 인 제3세대형 가속기로서 길이 160m의 선형가속기와 둘레 280m의 저장링으로 되어 있다. 또한 저장링 외곽에는 방사광을 이용한 실험 시설들이 위치해 있다. 현재 가동 중인 27기의 빔라인은 실험에 적합한 방사광을 이용하여 여러 가지 물질의 분석 및 미세가공 등을 수행하고 있다.

가속장치 개발에 따른 기술과 방사광 이용 과학에서 국가적 기반시설로 자리매김한 포항가속기연구소는 차세대 방사광 이용 시설인 제 4세대 방사광가속기 사업의 추진으로 다음 단계로의 도약을 준비하고 있다.

II. 포항 방사광가속기

2.1 선형가속기

선형가속기는 전자를 발생시키는 전자총과 가속시키는 가속관으로 이루어져 있으며 가속관의 첫 부분은 전자를 뭉치로 만들어 주는 pre-buncher와 buncher로 되어 있는 pre-injector가 위치해 있다. 그림 1에서 보여주고 있는 전자총에서는 캐소드, 어노드, 그리드 3극의 열음극 방식을 이용하여 길이 2 나노초, 순간전류 2 A의 전자빔을 저장링의 입사 빈도인 10Hz로 발생시킨

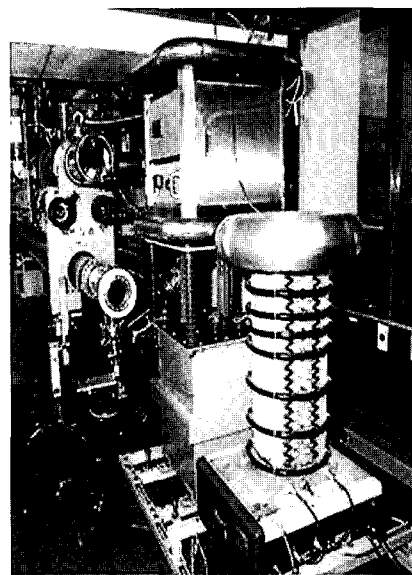


그림 1. 전자총

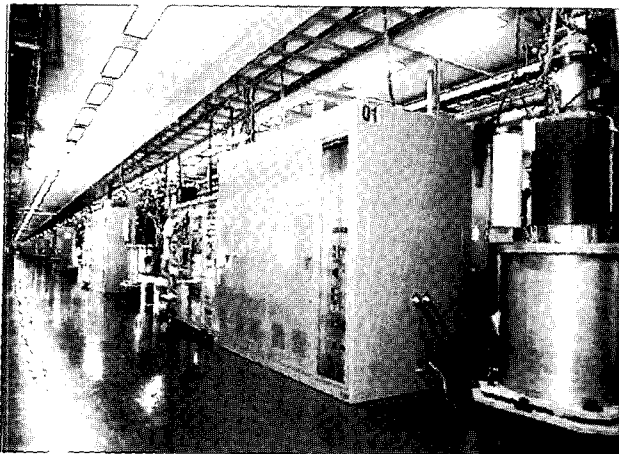


그림 2. 선형가속기 클라이스트론 및 모듈레이터 장치

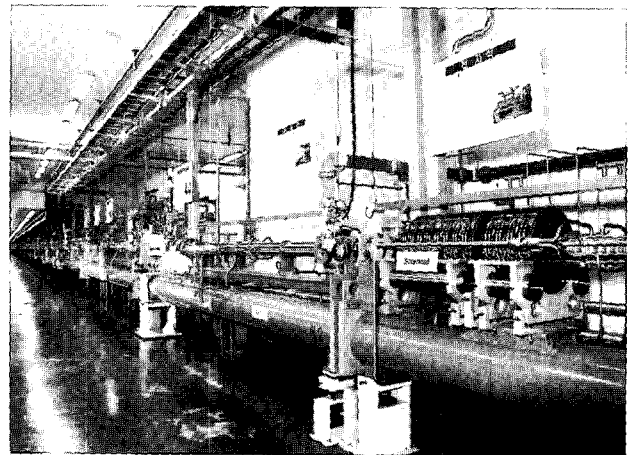


그림 3. 선형가속기 터널

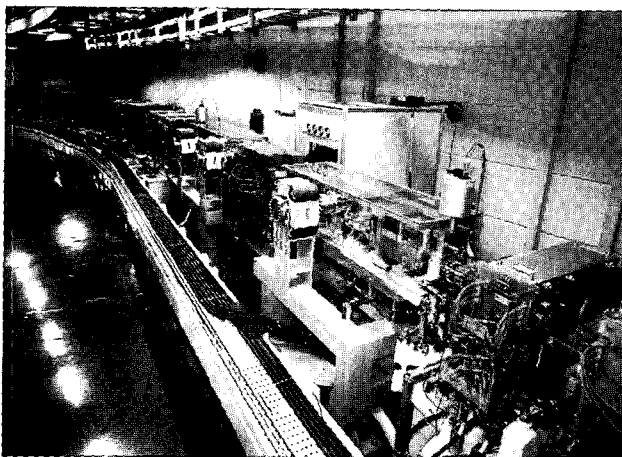


그림 4. 저장링의 입사 구역

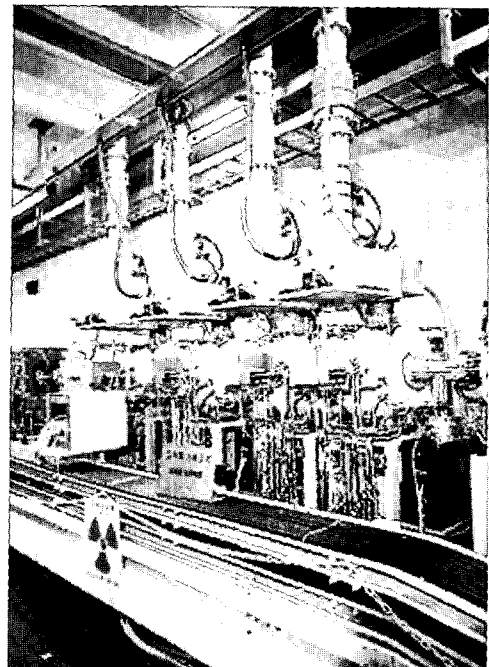


그림 5. 저장링 고주파 공명 장치

다. 또한, 원활한 전자 발생을 위해서 전자총은 5 nano Torr 이하로 진공도를 유지하고 있다 [1].

전체 가속관은 pre-injector를 제외하고 11개의 모듈로 되어있고 각 모듈에는 포항연구소가 자체 제작한 200MW 모듈레이터와 여기서 전력을 공급받는 80 MW 2,856 MHz 도시바 클라이스트론, 그리고 클라이스트론에서 출력되는 마이크로파를 압축시켜 전압을 높이는 SLED(SLAC Energy Doubler)가 지상에 그림 2와 같이 설치되어 있다. 그리고 이들에서 만들어진 최종 마이크로파는 도파관을 타고 그림 3과 같이 지하에 설치된 선형가속기 가속관으로 이동해 전자를 가속한 후 Dummy Load에서 소멸한다. 선형가속기는 정상 상태일 때 이온 펌프를 이용해 10 nano Torr대의 진공도를 유지한다. 또한 선형가속기에는 가속관에서 전자가 흐트러지는 것을 방지하는 4극 자석과 전자의 경로를 최적화 시키는

Corrector 자석들과 빔의 상태를 진단하는 장치들이 배치되어 있다.

선형가속기에서 거의 빛의 속도에 달하는 2.5 GeV까지 가속된 전자는 빔전송선(BTL: beam transfer line)과 입사장치(그림 4)를 통하여 지상의 저장링에 입사된다 [2].

2.2 저장링

입사된 전자를 원형의 궤도에서 계속 돌게 하는 저장

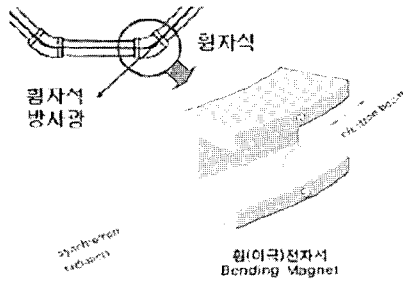


그림 6. 2극 자석에서의 방사광 방출 모습

링은 궤도와 집속을 조절하는 전자석들과 nano Torr 대의 초고진공 환경을 유지시켜 주는 진공장치[3], 그리고 방사광으로 인한 전자의 에너지를 보충해 주는 고주파 공명장치(그림 5) 등 다양한 장치들로 이루어져 있다. 저장링은 각각이 거울 대칭을 가지는 자석구조를 기본으로 하는 단위 셀이 다시 12번 반복되는 구조로 되어 있다. 각 셀은 2극 자석 3개와 4극 자석 12개 그리고 6극 자석 4개로 구성된 TBA(Triple Bend Achromat) 구조를 가지고 있다 [4]. 그러므로 전체 2극 자석의 수는 36개로 각 2극 자석마다 전자빔의 궤도가 10° 씩 휘어 원형을 이루게 된다. 이렇게 전자빔이 자장의 영향으로 운동 방향을 바꾸게 되면 그 지점에서 방사광이 나오게 되며 바로 이 방사광이 실험에 이용되는 것이다. 이러한 방사광에 의해 손실된 전자 빔의 에너지는 4개의 500 MHz 고주파 공명장치에 의해 다시 공급된다 [5]. 제3세대 방사광가속기란 기본적으로 전자빔 뭉치의 크기를 줄여 이러한 방사광의 세기를 크게 높임과 동시에 셀과 셀 사이에 삽입장치가 설치될 수 있는 가속기를 의미한다. 저장링에 설치된 2극 자석은 그 원래 목적이 전자 궤도를 원형으로 만들어 주는 것으로 사용자가 원하는 방사광을 만들기 위해 설계된 것은 아니다. 물론 그럼에도 2극 자석에서 나오는 방사광도 높은 이용가치를 가지고 있으나 3세대 방사광가속기에서는 사용자가 필요로 하는 방사광을 만들어 내기 위해 N극과 S극을 번갈아 배치한 자석을 설계하여 저장링에 설치함으로써 가속기의 효율을 극대화 하는데 이들이 위글러 언들레이터와 같은 삽입장치이다. 목적에 맞게 다양한 삽입장치를 만들 수 있지만 대체적으로 삽입장치에 의한 방사광은 집속의 효과가 높아 첨단 연구에 매우 적합하다. 이러한 방사광을 만들어내는 집속된 전자빔이 의미가 있으려면 저장링의 정렬 또한 그 수준으로 이루어져야 한다. 현재 원주 280 m인 저장링은 평균 상대오차가 0.15 mm 이내가 되도록 매년

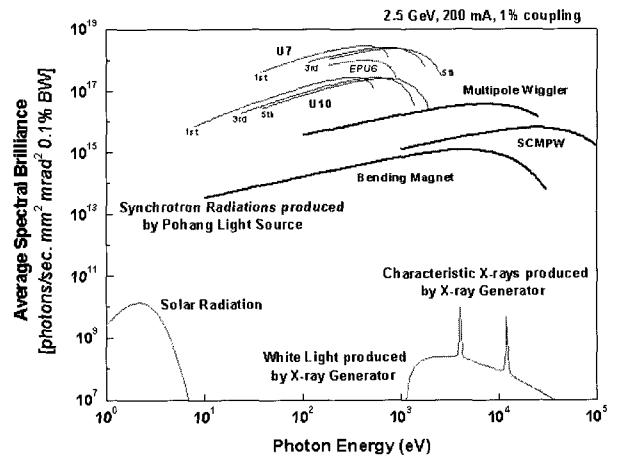


그림 7. 포항 가속기에서의 방사광과 기존 광원에서의 빛 세기 비교

측정과 정렬을 하고 있다 [6]. 앞서 언급하였듯이 포항 가속기의 저장링은 12 셀로 되어있어 셀과 셀 사이에 삽입장치를 설치할 수 있는 12개의 straight section 을 두고 있다. 이 중 1곳은 입사장치가 또 한곳은 고주파 공명장치가 위치하고 있으므로 삽입장치를 설치할 수 있는 straight section은 10곳이다. 2006년 11월 현재 이중 6곳에 삽입장치가 설치되어 있는데 1곳에는 두개의 삽입장치가 설치되어 전체 7개의 삽입장치가 설치되어 가동 중에 있다.

Ⅲ. 빔라인

3.1 빔라인 실험

포항 가속기의 저장링에서의 방사광은 기존 방식에 의한 빛에 비해 그 밝기가 최소 수천만 배에 달하는데 삽입장치로 최적화시킨 방사광은 특정 영역에서 그 이상의 밝기를 얻을 수 있다(그림 7). 또한 저장링의 특성상 원주 둘레에 다양하고 많은 사용자들이 동시에 실험을 할 수 있는 시설을 갖출 수 있다. 1994년 준공 당시 2극 자석을 이용한 X-선 산란 빔라인 1기와 진공 자외선 빔라인 1기 등 2기로 시작된 빔라인 수는 매년 꾸준히 2기 내지 3기를 증설해 2006년 11월 현재 27기의 빔라인이 완성되어 이중 26기를 사용자에게 제공하고 1기를 시험 운용 중에 있으며 추가로 4기의 빔라인을 건설하고 있다.

저장링에서 다양한 고성능 방사광을 만들어내므로 그

표 1. 가동 중인 27기 빔라인의 대표적 실험 영역

1B2	X-선 미세탐침	5C2	박막 성장 직접 연구
2A	타원편광	6B	생체 단백질의 결정 구조 해석
2B1	광전자 분광	6C	단백질 구조분석
3A1	각 분해능 광전자 분광	7B1	광전자 분광학
3A2	나노 구조물 물성분석	7B2	경질 X-선 현미경
3B1	원자 및 분자의 광이온화	7C1	X-선 흡수 분광학
3C1	X-선 흡수 미세구조 분석	8A	분광 현미경학
3C2	단결정/박막/분말시편 X-선 회절	8C1	X-선 산란
4A	거대분자 결정학	8C2	분말 회절 결정학
4B1	광전자 분광학	9C1	초미세 석판가공
4C1	고속속 소각 산란	10C1	단결정/박막/분말시편 X-선 회절
4C2	고 분해능 소각 산란	11A	물질구조 및 결정 분석
5A	고속속 X-선 산란 및 분광학	11B1	극자외선 석판인쇄
5C1	위상 대조 영상		

이용 또한 다양하다. 현재 방사광을 이용한 실험은 생명공학, 나노기술, 마이크로머시닝, 신소재, 표면연구 등 여러 분야를 망라하고 있다. 표 1은 현재 가동 중인 각 빔라인과 그 대표적인 실험 영역을 보여주고 있다.

현재 4기의 빔라인이 추가로 건설 중인데 이 중 3기는 흡수 미세구조 분석 위글러 빔라인, X-선 구조분석 빔라인, 고휘도 X-선 소각/광각 빔라인으로 저장링에 건설 중이며 나머지 1기는 펄스초 원적외선 분광학 빔라인으로 별도의 시설로 설치되고 있다. 이들 외에 2010년까지 10기의 빔라인을 증설해 총 40기의 빔라인을 저장링에 보유하는 것을 목표로 하고 있다.

3.2 빔라인 운영성과

1995년 2기의 빔라인으로 실험자 지원을 시작할 때 58건의 과제가 신청되어 18과제의 실험이 수행되었다. 이후 빔라인의 증가와 함께 신청과 수행 과제 수도 매년 크게 증가하여 2005년에는 신청 797과제 중 648과제가 실험을 수행하여 총 수행 과제가 2,848건에 이르렀다. 실험인원도 1995년 78명이었던 것이 2005년에는 1957명이 되어 총 실험 인원은 10,138명을 기록하였다. 방사광을 이용한 연구 성과는 2005년에 398건, 총 2,412건이 발표되었으며 논문들 중 다수가 저명 학술지에 발표되어 2002년 이후 국제 SCI 급 전문 학술지 게재 논문의 평균 impact factor가 3.2를 상회하고 있다.

몇 가지 우수 연구 사례를 살펴 보면 다음과 같다 [7]. X-선 영상 촬영기법으로 조영제 없이 쥐의 미세혈관을 촬영하는데 성공하였으며 [8], 구리-아연전기 도금시 결합을 유발하는 메커니즘을 밝혀내었고 [9], X-선 회절을 이용하여 위염이나 위십이지장 궤양, 위암 등을 발병시키는 원인균으로 알려져 있는 헬리코박터 파일로리의 Urease 단백질의 구조를 규명하였다 [10]. X-선 소각산란 기술을 이용하여 블록고분자라는 플라스틱으로 다양한 형태의 나노 구조를 제조하고 그 생성 메커니즘을 밝혔으며 [11,12], X-선을 이용한 스킴각산란이라는 분석 신기술을 개발하여 50 나노급 차세대 반도체 제조에 활용할 수 있는 나노구조의 절연 나노박막을 개발하는데 성공하였다 [13,14]. 또한, 연X-선 분광기술을 이용하여 스핀자석 나노 입자의 구조와 특성을 규명하였으며 [15], 인체 내에 존재하는 두 가지 형태의 DNA 접합 부위의 생김새를 세계 최초로 규명하는데 성공하였다 [16].

이러한 기초과학 분야에서의 성과뿐만 아니라 방사광은 산업에서의 응용 영역도 넓는데 정부는 1995년도에 방사광가속기 공동이용 연구사업 지원 규정을 제정함으로써 삼성, 포스코, LG, 하이닉스(당시 현대전자) 등 대기업과 산업체 및 벤처업체에서의 신기술 및 신제품 개발을 위한 방사광의 활용을 돕고 있다. 그 결과로 삼성종합기술원에서는 2001년 소형의 광통신 반도체소자 개발에 있어 불량품이 발생하는 원인을 비파괴 방사광 X-

OCTOBER 2006

PLS Beamline Status

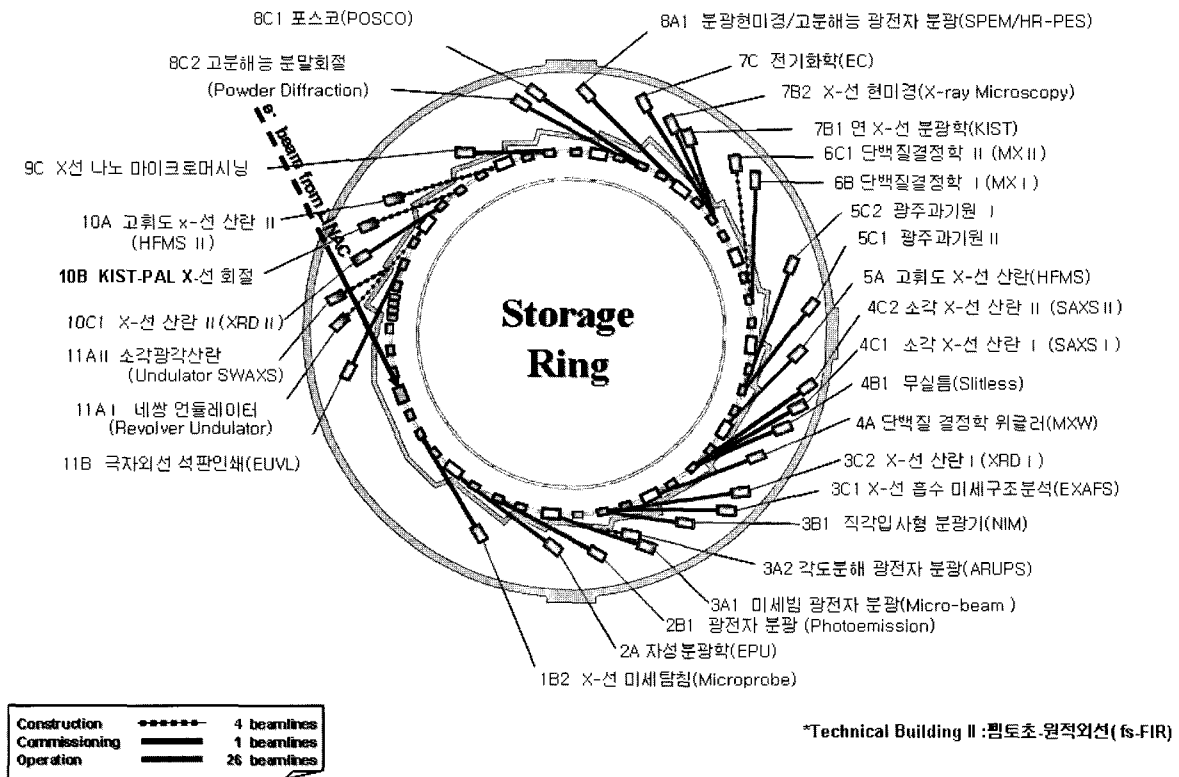


그림 8. 포항가속기연구소의 빔라인 실험 장치들

선 투과 영상 실험으로 규명함으로써, 불량률을 70%에서 10%로 현저하게 낮추는 큰 연구 성과를 올렸다 [17]. 포스코에서도 2001년부터 지금까지 비파괴 방사광 X-선 투과 영상 검사를 선박용 강재의 표면 및 내부의 불순물 관찰, 개선에 이용하여 고부가가치 철강 신소재 개발에 활용하고 있다. 방사광을 활용한 벤처기업의 신기술 및 신제품 개발연구도 활발하게 추진되어 크리스탈지노믹스(주)는 비아그라의 작동원리를 규명하고 [18] 또 이어서 비만치료에 탁월한 효과가 있는 신약 후보물질 발굴에 성공한 바 있다. 특히 지금까지 열거한 성과 중 DNA 접합부위 규명과 비아그라 작동원리 연구는 nature 지의 표지로 선정되는 개가를 올리기도 하였다.

IV. 제 4세대 방사광가속기 건설계획

방사광이 점점 더 넓은 영역의 과학자에게 요긴한 도구로 주목 받고 또 그 영역을 넓혀감에 따라 더욱 더 다양한 방사광에 대한 수요도 증가하고 있지만 가장 큰 관

심을 끌며 사용을 원하는 방사광 영역은 한 단계 더 작은 시료를 분석할 수 있는 도구로서의 방사광이다. 이를 위해서는 아주 강한 X-선을 작은 영역에 짧은 순간 동안 발생시키는 것이 필요하다. 이러한 방사광을 얻기 위해서는 이를 발생시키는 전자 빔도 이에 맞추어 시공간에서 아주 작게 집중되어야 한다. 반면 저장링의 경우 이러한 전자빔의 특성은 입사되는 빔에 상관없이 자체적으로 결정되며 입사된 후 보통 수 밀리초 후에는 해당 저장링의 고유 특성을 갖는 전자빔으로 안정되게 된다. 문제는 저장링의 특성으로 결정되는 전자빔으로는 현재의 방사광보다 한 차원 더 강하면서 작고 짧은 X-선 방사광을 발생시킬 수 없다는 것이다. 최근 개발되어 지금도 활발하게 연구되고 있는 RF 광음극(photo-cathode) 전자총을 이용하면 [19] 아주 작은 전자빔을 만들 수 있는데 저장링에 입사되면 곧 저장링 특성을 갖게 되므로 이 전자빔의 장점을 살리려면 선형가속기만을 이용하여야 한다. 선형가속기를 이용하여 발생된 전자빔의 특성을 유지하거나 또는 더욱 작게 만들면서 가속시킨 후 삽

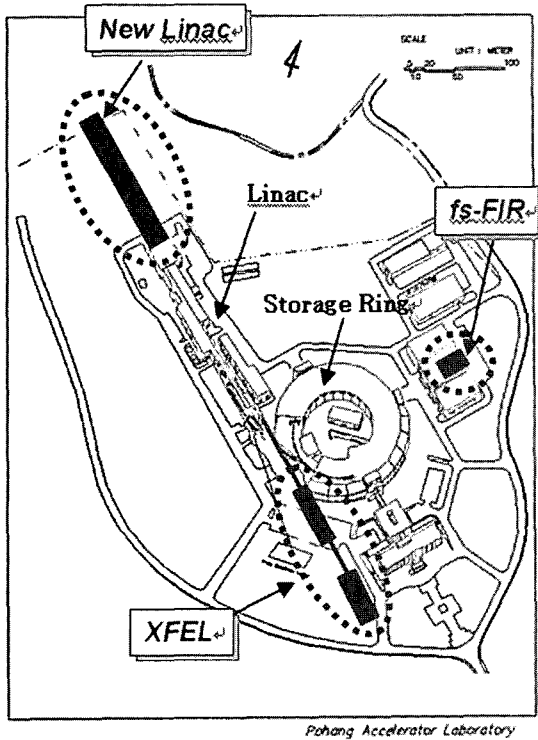


그림 9. 포항가속기 연구소의 제 4세대 방사광 가속기 (XFEL) 건설 계획

입장치를 이용하면 원하는 차세대 X-선을 얻을 수 있다.

즉, 작은 전자빔치로 부터의 방사광을 결맞게 만들어 X-선 자유전자 레이저를 발생시키고 이를 활용하는 것이다. 이를 이용하면 옹스트롬 단위의 X선을 마이크로미터 단위의 넓이에 펨토초의 순간으로 현재의 3세대 방사광보다 최소 10억배 이상 밝게 비출 수 있게 되어 원자나 분자 크기의 결합구조 분석 능력을 혁신적으로 향상시킬 수 있는데 이러한 시설이 제4세대 방사광가속기이다. 이를 이용하면 결정을 만들지 않고도, 있는 그대로의 생체분자 구조를 해석하고 또 생체막에 속한 단백질의 연구를 통하여 신약을 개발하는 길이 열리며 또한 원자, 분자 수준에서 펨토초 단위로 일어나는 진동, 회전, 분리, 재결합하는 결합구조의 변화를 파악하는 등 과학계에 새로운 영역의 도래를 불러올 수 있다.

현재까지 제4세대 방사광가속기가 가동되고 있는 곳은 아직 없다. 미국 스탠포드 선형가속기 연구소(SLAC)에서 2008년 말 완공을 목표로 4세대 가속기인 LCLS (Linac Coherent Light Source [20])를 건설 중이고, 독일 함부르크의 DESY 연구소에서 2012년 완공을 목

표로 European XFEL을 건설 중이며[21], 일본 간사이 지방의 SPring-8 연구소에서도 SCSS(SPring-8 Compact SASE Source) 건설을 추진 중이다 [22]. 이 밖에도 영국, 이태리, 미국 MIT대학 등에서도 각각 제4세대 방사광가속기의 건설을 제안하고 있는 상황이다. 제4세대 방사광가속기에는 매우 작은 전자빔 크기와 짧은 길이를 갖는 수 GeV 이상의 전자 빔을 제공하는 전자 선형가속기가 필요하다. 포항가속기연구소의 경우 이미 보유하고 있는 선형가속기를 활용하면 효과적으로 제4세대 방사광가속기를 건설할 수 있다. 현재 3세대 방사광 저장링에 필요한 전자 빔을 제공하는 데 하루 2회씩 각각 10분 이내로 사용 중이므로, 2.5 GeV 선형가속기를 확장하면서 성능을 개선하면 나머지 대부분의 시간은 X-선 레이저를 제공하는 4세대 방사광가속기 실험실비로 활용할 수 있다 [23]. 이를 위해서 그림 9와 같이 기존 선형가속기 시작 부분에 새로운 전용 입사기(FEL injector)와 추가 가속장치를 신설하고 기존 선형가속기 끝에 언듈레이터를 설치하여, 이 언듈레이터에서 발생된 X-선 레이저를 실험 건물로 유도하도록 4세대 방사광가속기를 구성하면 된다. 포항 가속기를 활용한 제4세대 방사광가속기는 미국의 LCLS나 독일의 European XFEL과 비교하면, 전자빔 에너지가 훨씬 작은 중형급 선형가속기를 사용하고 언듈레이터의 길이도 절반 수준인 상대적으로 소형이면서 경제적인 규모의 설비가 될 것이다.

다시 말하면, 2.5 GeV 선형가속기를 3.7 GeV로 확장 개선하고 자석 주기가 짧은 언듈레이터를 사용하면 0.3 나노미터의 X-선 레이저를 얻을 수 있다. 그리고 언듈레이터의 길이가 길어지는 것을 막기 위해서는 높은 자장강도를 유지해야 하는데 보통의 언듈레이터로 어렵다면 이를 위해 자극의 간격이 좁은 in-vacuum 형식의 언듈레이터를 사용하면 된다. 선형가속기로 고품질의 전자빔을 제공하기 위해서 무엇보다도 고휘도 전자빔을 만들 수 있는 새로운 전자빔 발생장치가 필요한데 앞서 설명하였듯이 고효율 적외선 레이저와 구리 금속전극, RF cavity를 조합한 RF 광음극 방식이 현재 여기에 가장 적합한 방법이다. 그리고 전자 빔의 에너지를 3.7 GeV로 올리기 위한 가속관, 발생된 전자빔의 크기를 유지하면서 전자빔의 길이를 압축하여 전자밀도를 높이는 뭉치 압축기(bunch compressor), 전자빔의 퍼짐을 막아주는 전자빔 광학장치 등이 새로운 선형가속기에 추가되어

야 한다 [24]. 이러한 장치 하나하나가 현존하는 기술보다 한 차원 높은 수준을 요구하기 때문에 현재 이러한 요구조건을 충족시키기 위한 설계에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다. 이와 더불어 전자총은 이미 1대를 만들어 성능 시험을 하였으며 이를 바탕으로 설계를 보정한 새로운 전자총으로 시험을 할 설비를 준비 중에 있다.

V. 맺는말

1994년 완공된 후 현재까지의 운영을 통하여 이룩한 성과는 2장에서 보여 준 빔라인 운영을 통한 실험성과도 중요하지만 가속기 보유를 통한 국제 사회에서의 위상 제고와 가속장치 유지보수 및 성능향상을 통한 기술 개발 및 축적도 이에 못지않은 중요성을 가지고 있다. 현재 국내 유일의 대형 과학 장치로서 축적한 기술은 기초 과학 지원연구원에서 추진 중인 핵융합장치 (KSTAR)와 원자력 연구소에서 추진 중인 양성자 가속기 사업 등 국내 다른 대형 연구개발 사업뿐만 아니라 국방과학기술개발, 포스코의 저공해 환경시설 등 민간 산업기술에 광범위하게 활용되고 있다. 또, 원자력병원과 공동으로 의료용 사이클로트론 개발에도 성공하여 암 치료용 가속기를 국산화하였으며 그 부수적인 효과로 외국산 제품의 도입가격을 낮춤으로써 연간 천억 원 이상의 경제적인 효과를 거두게 될 것으로 예상된다. 국제적으로도 세계 여러 가속기 연구소들과 기술 교류를 하고 있으며 또 규모가 커서 미국, 유럽, 일본 등 여러 나라가 공동으로 진행하고 있는 국제 선형 가속기(ILC: International Linear Collider) 건설 사업에도 참여하여 국가 위상을 제고시키고 있다.

포항가속기연구소는 건설기와 지난 10여 년간의 방사광 가속장치 운영 및 개발을 통하여 기술의 고도화를 이룩하고 방사광 이용분야의 지면을 확대하였으며, 일부 분야에서는 세계적인 경쟁력을 지니게 되었다. 이것은 우리나라 정부(과학기술부)의 과감하고 전폭적인 지원과 가속기 건설과 운영에 참여해온 포항가속기연구소 구성원들의 끊임없는 노력의 결과이다. 이 같은 발전에 힘입어 우리나라 최첨단 연구 분야에서 없어서는 안 될 중요 연구 기반시설로서 자리 잡은 포항 방사광가속기는 앞으로 기존 시설을 개선하고 새로운 시설을 건설하여 제3세대 방사광 시설의 국가적 과학기술 용량을 확충하는 한

편, 미국, 독일, 일본 등 과학기술 선진국들과 함께 제4세대 방사광원인 개발을 선도하며 보다 큰 발전을 꾀하고 있다.

현재 European XFEL의 Test Facility인 VUV 영역의 FLASH가 이미 건설이 완료되어 사용자에게 방사광을 제공하고 있으며 일본 SCSS도 기술 검증을 위한 1단계 자외선 시설의 건설을 성공적으로 완료하였다. 4세대 가속기는 새로운 영역인 만큼 좋은 시설의 확보도 중요하지만 빠른 시간 내에 확보하여 중요한 실험을 선점하는 것이 시급하므로 우리나라도 빠른 시간 내에 시설을 확보하여 선진국과 대등하게 기술경쟁을 할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Design Report of Pohang Light Source (revised ed.), Pohang Accelerator Laboratory (1992).
- [2] E. Milburn, S. H. Hong, S. H. Jeong, B. K. Kang, I. S. Kim, Y. M. Koo, N. S. Shin, and M. Yoon, "Injection System for the PLS Storage Ring," EPAC94 (1994).
- [3] D. Park, Y. J. Han, C. K. Kim, S. M. Chung, and I. S. Ko, "Operation Experience for PLS Vacuum System," PAC97 (1997).
- [4] J. Choi, T. Lee, K. Nam, and M. Yoon, "Magnet Lattice of the Pohang Light Source," PAC91 (1991).
- [5] J. S. Yang, M. H. Chun, I. H. Yu, Y. J. Han and S. H. Nam, "The Experiences of Operation and Performance of the 500 MHz CW Klystrons at the PLS Storage Ring," EPAC04 (2004).
- [6] W. SEO, A. H. MAENG, S. C. LEE, and I. S. KO, "Precision Surveying and Smoothing Analysis for Pohang Light Source," PAC97 (1997).
- [7] 이문호, 고인수, 물리학과 첨단기술, March 2005 (2005).
- [8] Y. Hwu, W. L. Tsai, J. H. Je, S. K. Seol, Bora Kim, A. Groso, G. Margaritondo, K.-H. Lee, and J.-K. Seong, Phys. Medicine Biology **49**, 501 (2004); Nature **427**, 800 (2004).
- [9] W. L. Tsai, P. C. Hsu, Y. Hwu, C. H. Chen, L.

- W. Chang, J. H. Je, H. M. Lin, A. Groso, and G. Margaritondo, *Nature* **417**, 139 (2002).
- [10] N. C. Ha, S. T. Oh, J. Y. Sung, K. A. Cha, M. H. Lee, and B. H. Oh, *Nature Struct. Biology* **8**, 505 (2001).
- [11] D. Y. Ryu, U. Jeong, J. K. Kim, and T. P. Russell, *Nature Materials* **1**, 114 (2002).
- [12] D. Y. Ryu, D. J. Lee, J. K. Kim, K. A. Lavery, T. P. Russell, Y. S. Han, B. S. Seong, C. H. Lee, and P. Thiyagarajan, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 235501-1 (2003).
- [13] B. Lee, Y.-H. Park, Y.-T. Hwang, W. Oh, J. Yoon, and M. Ree, *Nature Materials* **4**, 147 (2005).
- [14] B. Lee, W. Oh, Y. Hwang, Y.-H. Park, J. Yoon, K. S. Jin, K. Heo, J. Kim, K.-W. Kim, and M. Ree, *Adv. Materials* **17**, 696 (2005).
- [15] J. Park, K. An, Y. Hwang, J.-G. Park, H.-J. Noh, J.-Y. Kim, J.-H. Park, N.-M. Hwang, and T. Hyeon, *Nature Materials* **3**, 891 (2004).
- [16] Sung Chul Ha, Ky Lowenhaupt, Alexander Rich, Yang-Gyun Kim, and Kyeong Kyu Kim, *Nature* **1183**, 437 (2005).
- [17] 진정일 외, 포항방사광가속기 운영 10년, 한국방사광이용자협회 (2004).
- [18] B.-J. Sung, K. Y. Hwang, Y. H. Jeon, J. I. Lee, Y.-S. Heo, J. H. Kim, J. Moon, J. M. Yoon, Y.-L. Hyun, E. Kim, S. J. Eum, S.-Y. Park, J.-O. Lee, T. G. Lee, S. Ro, and J. M. Cho, *Nature* **425**, 98 (2003).
- [19] B. E. Carlsten, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **285**, 313 (2004).
- [20] LCLS Conceptual Design Report, SLAC-R-593 (2002); <http://wwwssl.slac.stanford.edu/lcls>
- [21] TESLA-XFEL Technical Design Report, Supplement, DESY 2002-167, TESLA-FEL 2002-09 (2002); <http://www-hasyllab.desy.de/facility/fel/xray>
- [22] T. Shintake, et al., "SPring-8 Compact SASE Source(SCSS)," in Proc. the SPIE2001, San Diego, USA, 2001; <http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [23] 오종석, 이익재, 물리학과 첨단기술, March 2005 (2005).
- [23] J. S. Oh, D. E. Kim, E. S. Kim, S. J. Park, H. S. Kang, T. Y. Lee, T. Y. Koo, S. S. Chang, C. W. Chung, S. H. Nam, and W. Namkung, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **528**, 582 (2004).

Pohang Accelerator Laboratory and the 4th Generation Light Source

Jinhyuk Choi

Pohang Accelerator Laboratory, Pohang 790-784

(Received 27 October, 2006)

The Pohang Light Source (PLS) of Pohang Accelerator Laboratory (PAL), which was constructed in 1994, is a 3rd generation synchrotron light source user facility. It consists of 2.5 GeV linear accelerator and a storage ring with circumference of 280 m. Presently, 27 beamlines around the storage ring are in operation providing synchrotron radiations to users. In addition, PAL has a construction project of the 4th generation light source. In this paper, the operation status of the PLS is described and the prospect of the 4th generation light source is reviewed.

Keywords : BPM, Beam position monitor, Cavity-type beam position monitors, Vacuum brazing.