

포항공과대학 방사광가속기 건설계획

오 세 응

(포항공대 물리학과 교수)

포항공과대학은 대단위 연구시설의 하나로서 740억원 규모의 제3세대 방사광가속기(PLS)를 건설키로 확정하고 1988년 4월 이의 추진에 착수하였다. 이 시설 및 추진현황을 소개한다.

1. 서 론

자장에 의해서 전자(또는 대전입자)의 궤도를 휘게 하면 전자파 복사를 수반한다. 이때 복사강도는 전자의 속력에 크게 의존하여 광속에 극히 가까울 때 비로서 현저하게 나타나기 시작하며 동시에 강한 방향성을 수반한다. 이러한 전자복사를 Synchrotron radiation(일본에서는 synchrotron orbital radiation = SOR)이라 하며, 그 복사광을 방사광 또는 단순히 광(light) (참고로 전자의 진행방향으로 감속시의 복사는 Bremsstrahlung)이라 부른다. 이때 나오는 방사광은 소위 critical 파장(또는 critical energy $E_c = h\nu_c$)을 중심으로 적외선에서부터 초자외선 내지는 경 X선에까지 이른다. 또한 광속밀도가 엄청나게 높은데다 더우기 고도의 방향성(속도의 방향으로)이 있어 원거리 운송이 가능하며 각종 연구의 도구로 적합하다는 것이 알려져 있다. 이러한 방사광을 실제로 인위적인 장치에 의해서 다량으로 발생시키게 된 것이 1960년대이다. 당시 고 energy 물리 실험용으로 건설된 electron-positron collider 등에서 부산물

로 흘러나오는 방사광이 입자 물리학자들에게는 귀중한 존재였지만 다른 일련의 과학자들이 이를 활용 가능한 것임을 알게 되었고 이 시설에 기생하여 원자, 분자물리 기타 물성연구들을 시작하였다. 그러다가 이용분야가 늘어남에 따라 이런 Group 전용의 방사광 발생장치로서의 “방사광 가속기”(synchrotron radiation source = SRS) 또는 단순히 light source라 칭한다)가 1970년대에 건설 되었다.

이를 제 2세대라 칭하고 그 이전의 것을 제 1세대로 구분한다.

이들 방사광 발생장치의 구성을 보면 중심장치로서 storage ring (저장링)이 있어 전자빔을 링 중심을 따라 몇시간동안 계속 회전시키면서 방사광을 발생시킨다. 그동안에 후술하는 여러 원인으로 전자빔을 많이 잃게 되는데 그때는 남은 빔을 버리고 injector에서 새로 공급 받는다. 여기서 injector system이란 전자빔을 발생시켜 이를 고속으로 가속한 후 저장링에 넣어주는 역할을 하는 장치이다. 제 2세대 방사광가속기에서는 이 저장링 둘레에 사용자인 연구원들을 위한 beam line이 수십개가 배열되어 있다. 또한 특수목적용을 위한 방사광을 얻기 위해서 링의 직선부분에 삽입장치(insertion device)로 불리는 특수 자석장치를 넣기도 했다. 그후 십여년간 방사광을 이용한 연구분야도 기초과학은 물론 응용과학, 공학, 의학 및 산업계에 이르기까지 폭넓게 파급되었다. 미국의 Brookhaven National Lab. (BNL)의 National Synchrotron Light Source

(NSLS)의 경우 천여명의 방사광 시설을 이용하고 있고 다른 3천명이 사용하기를 원하고 있으나 beam line의 부족으로 대기하고 있는 실정이다. 영국의 경우도 비슷한 상황이어서 Daresbury Lab.의 SRS (Synchrotron Radiation Source)도 2:1로 사용희망자들이 밀려 있다. 이러한 폭발적인 수요의 급증에 따라 이들 제 2세대 방사광가속기의 경험을 통해서 소위 제 3세대라 불리는 사용자의 요구를 극대화한 가속기의 설계, 건설을 서두르는 것이 최근 몇년간의 세계적인 동향이다.

여기에서 극대화란 우선 beam port를 최대한으로 늘리고, 전자 beam의 emittance (beam phase space area = beam의 단면적 × 단면간의 두 방향으로의 divergence)를 줄여 방사광의 광속밀도를 극대화하고 6-7m 정도의 긴 drift space(직선인 진공chamber)속을 전자 beam이 지나가도록 하고 여기에는 집속용이나 휘임용 전자석등이 일체 없고, 삽입장치(insertion device)를 넣을 수 있다. 이 삽입장치로는 소위 undulator와 wiggler 두가지가 있어 전자는 특정광파장 부근의 광속밀도가 극히 높고 더우기 광속의 발산도(divergence)가 극히 작은 방사광을 뽑아내는 장치이고, 후자는 방사광의 파장을 더 짧은 경 X선(가령 2.5GeV 저장링의 경우 20keV-keV 광자) 쪽으로 옮기는 장치이다. 여기서 가장 중요한 것은 저장된 전자빔의 energy이다. 전술한 복사광자의 critical energy E_c 가 전자빔의 energy의 제곱에 비례(그리고 걸여준 자장의 세기 B 에 비례한다)하기 때문이다.

포항공대에서는 포항제철의 적극적인 지원을 받아 국내의 전 소요를 충당할 수 있는 제3세대 방사광가속기를 건설하기로 확정하고 이의 설계 및 연구에 착수하였다. 우선 energy를 2.0GeV로 택하였다. 이 에너지에서 E_c 는 2.6keV이어서 VUV(초자외선)는 물론 10keV까지는 충분한 방사광을 얻을 수 있기 때문이다. 또 Wiggler를 쓰면 유효영역을 50keV까지 올릴 수 있다. 한국 과학계의 장기적인 안목으로 볼 때 방사광의 critical energy가 더 높은 것이 매우 바람직하다. 그런 견지에서 최소한의 장치변경으로 본 가속기 저장링의 가동 energy를 2.5GeV(이 경우는 $E_c=5keV$)로 장치 올릴 수 있는 여지가 있도록 설계되었다. PLS 건설을 추진함에 있어

injector 자체는 해외에서 설계 및 제작이 가능한만큼 외국의 우수 연구소 및 공급회사들과 여러 가지 방안을 협의중에 있어 본문에서 이 부분은 간략히 기술하겠다.

한편 제3세대 저장링은 PLS 저장 energy인 2GeV(또는 그이상) 부근에서는 아직 기술개발을 수반해야 하고 외주도 불가능하므로 이는 우리 연구진이 자체설계하고 주요부분을 자체설계하고 주요부분을 국산화하기로 결정하였다. 본 논문은 이 저장링에 대해서 소개하고자 한다. 그러나 저장링 자체가 여러기능의 복합으로 되어 있어 각 기능별로 전문 과학자들이 분담하여 설계 연구를 추진하고 있다. 각 부분별 상세한 설계연구에 관해서는 부분별 전문 과학자들의 논문을 별도로 게재하였다.

그러므로 본 논문에서는 각 부분을 소개하는 정도에서 그치겠다. 또 삽입장치는 저장링의 긴 직선부분에 10개가 들어갈 예정이며 이들에서 나오는 방사광과 36개의 휘임자석에서 나오는 방사광(36개)를 제각기 방사광 beam line에 연결하게 되어있다. 이렇게 하여 총 46개의 beam line이 설치될 예정인데 사용자의 요구에 따라 제각기 특성을 달리하게 되므로 이를 전부 기술할 수는 없다. 따라서 이 부분은 3-6에서 간략한 소개로 대신하겠다.

2. 방사광가속기 개요

전술한 바와 같이 방사광가속기는 injector system, 저장링, 삽입장치 그리고 beam line으로 구성되어 있다.

2.1 Injector system

Injector system으로는 full energy(그러니까 2 GeV) electron linear accelerator(선형가속기 = LINAC)를 우선 대상으로 선정되었다. 우선 전자 gun으로 불리는 전자 beam 발생 장치에서 100 keV 정도를 걸어 4A의 전자 beam을 뽑아낸다. Beam이 Linac에 입사되면 2.88GHz의 고주파 전장에 의하여 점차적으로 가속되어 출구쪽에서 2GeV가 되어 나온다. Linac 내부는 일련의 구리원통들이 줄로 나열되어 있고 이들을 따라서 고주파 전(자)장이

달린다(travelling E field). 이 전자장은 길이 방향으로 불과 6m내외의 짧은 공간에만 집중되어서 진행하기 때문에 이 pulse와 같이 따라가는 전자들만 계속 가속된다. Linac의 전장은 220m 정도이며 이 수직들에서 쉽게 산출되듯이 평균 가속 voltage가 10MV/m 내외이다. 이를 성취하려면 고출력 klystron을 사용해야 하고 그것으로도 부족해서 연속작동은 못하고 60Hz 정도의 맥동형작동을 한다. 또한 이와 같이 긴 Linac속을 beam이 발산되지 않고 통과하려면 집속을 시켜야 한다. 이 목적으로 4극자석들이 길이를 따라 군데 군데에 삽입되어 있다.

3. 저장 ring

Linac에서 나온 전자 beam은 운송관(beam transfer line)을 거쳐 저장링에 입사된다. 저장링의 기능은 전자 beam에 무한순환궤도를 제공함으로써 전자가 이 궤도를 300억회(8시간) 정도 반복 회전시키도록 하는 것이다. 이런 기능을 수행하는 것을 "저장"으로 표현한다. 저장을 하려면 휘임자석이 궤도둘레에 배치되어 있어 총 360도 회전이 가능해야 하고 또 beam의 발산을 막기 위해 집속장치가 필요하다. 집속장치는 4극자석들로 되어있고 6극자석들이 이를 보정한다. 이들 3종의 전자석의 강도, 길이는 물론이고 배열방식과 갯수가 저장능력 및 저장된 beam의 특성을 결정한다. 따라서 이를 최적이 되도록 설계하는 연구가 선행되어야 하며 PLS도 Beam Dynamics Group이 있어 이를 수행하고 있다. 아래의 3.1 저장링 lattice에 이 부분을 소개한다.

전자 beam이 순환궤도를 계속 돌려면 이 궤도를 따라 고도의 진공이(작동시에 $1 \times 10^{-9} = 1n \text{ Torr}$ 이하)이 필요하다. 그래서 이 둘레를 따른 진공 chamber가 필요한데 이는 ring형태로 되어 있다. 그래서 저장기능과 ring형태를 합쳐서 저장링으로 부른다. 이 속에서 도는 전자들이 사실상 광속도이어서 여러 형태의 beam instability를 유발할 수 있다. 이 instability를 줄이도록 chamber를 설계한다. 또 진공 pump의 선택도 중요하다. 3.2 진공 system에서 이 부분을 기술하며 PLS에 진공 system 전달 Group이 있다.

한편 전자석들은 자장분포에 있어서 필요한 기능을 주는 성분 이외의 다른 성분(이를 불순성분이라 한다.)이 있으면 안 된다. 예컨대 2극 전자석은 균일한 강도의 자장이 그것도 beam궤도면에 수직방향으로 분포되어 있어야 하는데 이렇게 이상적인 전자석은 이론상 설계가 불가능하지만 이에 극히 가깝도록 설계한다. 따라서 이들 2, 4 및 6극(그리고 후술하는 궤도미세 교정용 전자석도 포함) 전자석을 설계 및 제작을 전담하는 Magnet Group이 있고 또 전자석들에 정밀도 높은 전류를 공급하도록 전류전원 장치를 설계하는 Magnet Power Supply Group이 있다. 이 분야에 관한 기술은 3.3에서 한다.

저장링을 따라 계속 회전하고 있는 전자들은 자장을 통과할 때마다 방사광을 방출하여 energy를 잃는다. 그 이외에도 진공 chamber내의 잔류입자와 충돌로, 그리고 Coulomb력 작용으로 chamber 벽을 따라 그림자처럼 따라다니는 image charge등으로 말미암아 계속 energy를 잃는다. 이를 보충하기 위해서 rf (radio frequency) cavity가 ring 한군데에 설치되어 있어 전자가 이곳을 통과할 때마다 잃는 energy만큼 보충을 받는다. RF cavity이므로 타이밍이 맞게 cavity를 통과한 전자들만 적절한 보충을 받아 계속 링에 남아 있다. 나머지들은 이 cavity에서 너무 많은가 너무 적은 energy를 공급 받으므로 결국은 궤도에서 벗어나 진공 chamber나 그 속에 있는 삽입물질을 때려 제거된다. 실은 energy focusing(아래에 기술)으로 불리는 집속작용이 있어 에너지가 약간 상하하는 전자들도 계속 링에 남아있게 된다. 이를 전담하는 것이 rf Group으로 이 분야의 기술은 3.4에서 한다.

상술한 바 전자석, 진공 chamber는 설치시 아무리 공을 들여도 0.1mm이하로 정밀하게 배열하는 것은 불가능하며(참고로 링의 길이가 276m이다.) 또 배열각도 등에서도 약간씩의 오차가 있다. 이런 배열오차 때문에 상응하는 교정이 따르지 않으면 저장은 불가능하다. 이 오차교정을 목적으로 오차를 검색하는 beam position monitor등 각종의 monitor와 이 monitor들의 신호에 따라 궤도교정을 꾀하는 교정용 전자석이 링을 따라 배치되어 있고 검색장치들로부터의 정보를 processor를 거쳐 computer에서 분석하며 이에 상응하는 교정신호를 교정용 전자석에

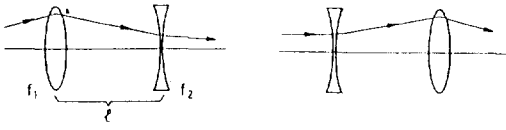


그림 2. FODO 구조에서 두개의 4극 자석을 통하여 입자가 집중되는 형태

집속이다. (그림 2)

이렇게 배열하면 수평방향 뿐만 아니라 수직방향에서 보아도 역시 집속이다. 초기의 방사광가속기의 저장링은 모두 이 형이었고 제2세대의 것들도 대부분 여기에 속한다. (제2세대에 속하는 BNL의 NSLS 링은 Chaman-Green lattice이다.)

제3세대의 저장링은 FODO lattice를 기피하는 경향이 뚜렷하며 DBA 또는 TBA를 쓴다. (그림 1 참조) 뒤에 기술하는 삼입장치를 넣을 충분한 길이의 직선부분을 두기 힘들다는 것이 FODO의 단점이다. DBA는 글자 그대로 두개(Double)의 휘임자석(Bend)이 한 cell에 들어가 있고 그 두 Bend 사이에 4극자석들을 잘 배치해서 전자궤도에 큰 색수차(Archromat, 실은 분산)가 있게 설계한다는 것이다. TBA는 두개 대신 세개의(Triple) 휘임자석이 있는 구조를 말하며 4극 및 6극 자석의 배치도 이에 따라 달라진다. TBA lattice 역시 중간 부분에 약간의 색수차(및 분산)가 있게 설계한다. 전자의 energy(즉, 속력)가 설계 전자의 energy에서 벗어나 있으면 이를 색이 있다고 표현한다. PLS의 경우 beam 속엔 전자의 energy가 설계도에서 $\pm 1.5\%$ 까지 벗어나는 것들이 같이 돈다. 색수차가 있다는 것은 곧 이들의 궤도가 색에 따라서 다르다는 것이다. 궤도가 다르면 링 둘레로의 궤도의 길이도 색에 따라 달라진다. 보통은 전자의 energy가 높아지면 그 속력은 사실상 고정되어 있고(광속도 부근으로) 대신에 상대론적 질량만 는다. (PLS의 경우 2GeV이므로 $m/m_0 \approx 4000$ 이다. 또 $V/C = 0.99999997$ 정도) 그래서 궤도가 설계궤도보다 밖으로 치지고, 따라서 분산이 생기며 그 결과 일주하는 길이가 길어진다. (또한 시간도 오래 걸리며 결국 뒤로 처지게 된다.)

그런데 RF cavity의 주파수는 설계궤도를 달리는 전자의 회전주파수에 맞추었으므로 뒤로 처지는 전

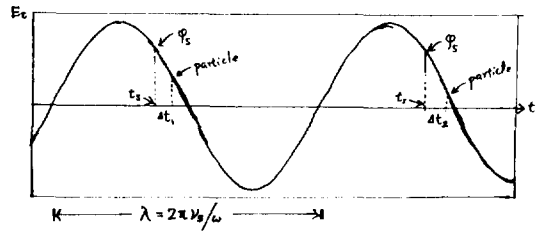


그림 3. 저장링에서 설계된 입자에 관해 종축방향으로 위상의 차가 늘어난 입자가 phase oscillation 하는 것을 나타내는 그림

자는 (그림 3) energy 보충을 점점 덜 받게되었다. (내려가는 전장일 경우) 그렇게 몇십바퀴를 지나면 이 전자의 energy가 설계전자의 energy와 같아지며 이때 시간차(뒤로 처진 거리)가 최대이다. 그후는 energy가 점점 아래로 처지면서 시간차는 대신에 줄기 시작한다.

이것이 계속되어서 energy차와 시간차(거리의 차)가 $\pi/4$ 의 위상차를 두고 진동한다. 이 현상을 Synchrotron Oscillation(또는 Phase oscillation 및 energy oscillation등으로 불린다.)이라 부르며 이런 식으로 시간-energy의 좌표에서 설계에너지를 중심으로 단진동을 일으키게 한다는 뜻에서 energy focusing이라고도 한다.

PLS의 경우 링을 일주하는데 약 $0.92\mu s (= 0.92 \times 10^{-6})$ 거리며 synchrotron oscillation엔 $106\mu s$ 정도 걸린다. (참고로 이 두 수치의 비 즉, $0.92/106 = 0.0087$ 을 synchrotron tune이라 한다.) 설계궤도 이외에 설계에너지보다 높거나 낮거나 한 전자의 집산에도 준이상궤도를 구할 수가 있다. 이들은 자석등의 대칭축을 지나지 않지만 폐곡선궤도(closed orbit)를 그리며 전장을 따라 lattice의 갯수와 동일한 대칭을 갖는다.

이상의 설명을 토대로 PLS의 저장링을 살펴본다. 그림 4에서 보는 바처럼 우리는 TBA lattice를 택했다. 이런 것이 12개가 모여 수장을 이룬다. cell 사이엔 6m 이상의 직선부분이 있어 이중 10개에는 삼입장치가 들어가고 나머지 2개중 하나는 Linac에서의 beam 입사용으로 또 하나는 rf cavity 삼입용으로 쓰인다. 삼입장치가 있는 곳에는 beam 단면적이 작아야 하므로 색에 따른 분산이 있으면 안된다.

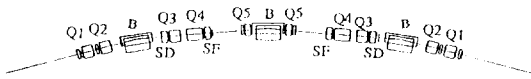


그림 4. PLS lattice의 한 cell 구조

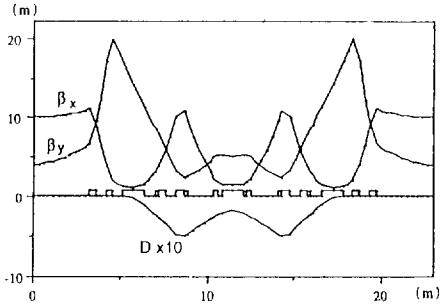


그림 5. PLS에서 하나의 cell 내에서의 lattice 함수 등

그런데 휘임자석이 분산을 일으키는 주범이며 4극자석도 약간의 분산을 일으킨다. 그래서 그림 5에서 보듯이 lattice속의 achromat광 (D로 표시된 부분) 부분을 두어 분산을 시키고 여기에서 4극자석들에 의해서 분산에 대한 적절한 보정을 한다. 그 결과 양단의 직선부분(삽입장치가 들어가는 곳)에서는 분산이 없다. (따라서 Beam크기가 작아진다.) 이 그림에서 보면 lattice의 처음과 끝 자석을 기점으로 해서 분산곡선(dispersion function)이 0이 된다. 분산을 4극자석으로 없애는 원리로는 굴절율이 다른 매체로 된 프리즘을 여러개 복합해서 무분산 프리즘을 만드는 것과 동일하다.

그림 5에는 그 이외의 beam의 특성이 들어 있다. 베타함수(beta function)가 그것이다. 여기서 횡좌표는 삽입장치가 들어가는 직선부분의 절반점(즉, 좌, 우 cell의 대칭점)을 기점으로 하였다. 실제 beam의 각점에서의 크기는 이 베타함수 값에 비례한다.

삽입장치가 들어갈 양단의 직선부분에서 베타값이 비교적 큰 이유는 직선부분이 너무 길어 “베타”를 한 곳에서(예컨대 대칭점) 줄이면 대신 거기에서의 발산도가 그에 상응해서 커지므로(Liouville의 정리) 직선의 다른 부분에서 “베타”가 더 큰곳이 생긴다. 그런데 이 삽입장치를 유용하게 쓰려면 이 직선 전장에 걸쳐서 골고루 beam 크기가 작아야 하므로 어느 한곳이라도 큰곳이 있으면 덕을 본 모든것을 잃

는다. 전자 하나하나의 궤도는 상기한 바 “베타” 함수와는 무관하다. 한 지점에서 beam의 크기는 이 모든 전자궤도의 포락선으로 결정되며 베타함수는 바로 이 포락선에 비례한다. 전자들이 링을 도는 동안 자기에너지에 해당하는 폐곡선궤도를 중심으로 집속을 받는데 그 결과는 기본적으로 단진동이다. (더 엄밀히 말하면 이 진동을 Fourier 전개해서 그 기본함수만 취했을 때) 이 단진동이 링을 일주하는 동안 몇번 일어나는지 나타내는 값이 betatron oscillation frequency(또는 betatron tune)이라는 것으로 표시한다. 수평방향과 수직방향으로의 진동수가 다르므로 이들을 구분해서 ν_x 와 ν_y 로 표시하였다. 전자가 링을 따라 단진동을 하면서 오랫동안 저장되어 있으므로 자장등에서 유도되는 구동력(이 구동력은 Fourier 전개했을 때 정의상 정수가 된다.)과 공진현상을 일으킬 수가 있다. 그렇게 되면 진폭이 무한정 자라서 결국 진공벽을 때리게 되므로 설계시 공진을 피하도록 V_x, V_y 값을 잡는다. 이것이 그림 6에 있다. PLS에서는 $\nu_x=14.28, \nu_y=8.18$ 이다. 그런데 전술한 분산 및 색수차의 영향으로 그림

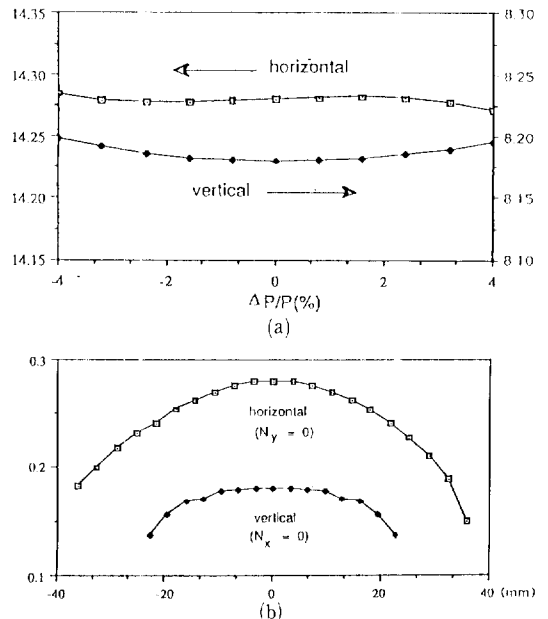


그림 6. (a) PLS 저장링에서 빔의 운동량(또는 에너지)에 의존하는 tune의 변화
(b) PLS 저장링에서 빔의 진폭에 의존하는 tune의 변화

6에서와 같이 ν_x , ν_y 가 색(곧 전자의 energy)에 따라 다르다. 어차피 $\pm 1.5\%$ 정도의 energy 진동은 허용해야 하는데 이 범위내에서 ν_x 나 ν_y 가 공진을 일으키는 정수로 너무 가까워 접근해서는 곤란하다. 이를 피하기 위해 6극자석을 한 cell당 4개를 두어 이 그림에서와 같이 교정한다(색수차 교정), Lattice의 전자석들의 위치, 세기 등은 아직도 연구가 계속되고 있다.

3.2 진공 system

전자 beam이 PLS 저장링을 돌때 고주파 cavity에서의 가속 phase와 장단이 맞게 점선형으로 배열되어 돈다. 이 점선형(pulse : 뭉치로 칭하겠음.) 뭉치는 길이 약 1cm에 뭉치간격은 60cm정도이다. 이들의 단면방향으로의 크기는 3.1에서 기술한 바(그림 5참조)와 같이 beta-함수에 비례하며 beta-함수는 cell 둘레를 따라 변한다. 또 beam의 경계가 뚜렷하게 있는 것이 아니고 전자밀도가 Gaussian 분포, $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2}$ 를 하고 있다. 여기서 x는 beam의 중심으로부터의 수평(x) 또는 수직(y)거리이다. 그래서 그림 5에서 좌단(우단도 같다.)에서의 1σ 를 beam의 크기로 잡을 때 $1\sigma_x$ 는 0.34mm, $1\sigma_y$ 는 0.13mm이다. 이 뭉치속의 전자들은 고주파에 의한 가속, 放射光量子방출에 의한 변속(고전 전자기학적으로는 자장내에서의 방사광방출은 연속적이며 이에 의한 연속적인 energy 상실과 이를 보충하기 위한 rf로의 가속을 계속 반복하면 점점 전자 beam의 size가 0으로 수렴하였다. 그러나 자장내에서의 전자의 방사광 방출이 연속적이지 않고 불연속적인 광양자방출이기 때문에 이상적인 경우에도 σ_x , σ_y 는 0이 안된다.), 그리고 뭉치속에서 서로 충돌(열운동)을 하면서 계속 이들의 상대적 위치 및 속도가 상하한다.

기타 교란작용까지 합해 beam이 살아있는 (lifetime) 약 8시간동안 전자의 일부는 6σ 이상으로 퍼진다. 그래서 이런 특성을 가진 beam을 beam dynamics group에서 연구, 제시한 바대로 표현하자면 이에 응당한 충분한 내부공간이 있는 진공 chamber가 링 둘레를 따라 설치된다. 돌고있는 전자들이 잔류가스분자와 충돌해서 잃어버리는 것을

줄여 beam lifetime이 8시간 이상이 되게하려면 진공값이 1n Torr 또는 그 이하로 되어야 한다.

실지로 링을 따라 수십개의 ion pump가 부착되어 있고 또 chamber 내부에는 NEG(gas 흡수에 의한 pump의 일종)를 넣어 pumping을 도울 계획이다. chamber 재료로는 특수처리한 알루미늄 또는 非磁性 특수스테인레스(SS316-LN)를 쓸 수 있는데 우리는 후자를 선택했다. 약 2mm 두께의 스테인레스 판으로 챔버를 성형하고 다시 이들을 TIG 용접 및 flange 등으로 접속하여 링 둘레를 조립한다. 고진공을 얻기 위해서는 이들을 용접하기 전후에 각종 약물 세척 및 용매세척을, 또 조립전후에 950°C 및 150°C 에서 구워서 벽 표면 및 벽 내부에 있는 잔류 가스를 없애야 한다. 그후 leak test를 거쳐 0.1-0.01nTorr를 얻게되면 그때부터 각종 전자석과 진공 chamber들을 정밀배열(alignment) 하는데 전장 276m에 오차가 0.1mm로 되어야 한다. 이 시점에서 Linac으로부터의 2GeV 전자 beam의 입사시험을 시작한다.

일단 beam이 돌기 시작하면 이 beam을 이용해서 진공 chamber 벽의 "beam cleaning"을 병행한다. Beam cleaning이란 beam이 돌때 휘임자석에서 굴절되면서 나오는 방사광을 이용 이들이 chamber 벽속에 흡수되면서 내부에 아직도 남아 있는 gas 분자들을 내쫓는 것이다. 이 때문에 처음에는 진공도가 100n Torr정도로 나빠진다. 전자 beam의 전류를 계속 증가하면서 이 beam cleaning을 100시간·암페어(실제로 걸리는 시간은 수개월)정도 계속하면 beam이 도는 동안에도 1n Torr 정도까지 유지되게 된다.

링 둘레에는 방사광을 뽑아내어 beamline으로 보내기 위한 port들이 46개(현재 계획)가 있다. 이 port들이 chamber 벽에 있는데 실지로 여기를 통과하는 방사광은 전체의 극히 일부이며 나머지는 chamber 내부에서 흡수되어 가열 및 벽내 기체방출, ion 방출등의 나쁜 역할을 한다. 이를 덜어주기 위해 crotch라고 불리우는 구리(또는 구리+베리륨)를 재료로 한 방사광흡수체를 링의 내부 여기저기에 배치한다. 이들은 수냉각이 되어있다.

진공 system group의 고민은 또 있다. 전자 beam이 흐르므로 Coulomb 전장과 자장을 형성하는

데 전장은 벽에서 끝이기 때문에 대응하는 image charge가 벽표면에 생긴다. 전자가 사실상 광속도로 움직이므로 이 image charge의 흐름에도 저항이 생긴다. 진공 벽의 전기성이 급변하면 (예컨대 단면이 갑자기 변하는등) 반사를 하여 나쁜 영향을 미친다. 또 beam이 pulse의 연속이기 때문에 소위 "wake field"를 조성한다. 이런 것들이 한 pulse내의 head-tail effect, 그리고 앞 bunch가 남기고 간 wake field에 뒤 pulse가 교란되는 것등의 작용을 연구하여 이들의 작용을 (통털어 collective beam instabilities라고 한다.)을 최소화 해야 한다. 이런 연구를 beam dynamics group과 더불어 수행한다.

"Ion trapping" 문제도 연구가 진행되고 있다. 이는 음전기를 댄 전자 beam이 돌때 양전기를 댄 ion들이 이들 궤도축상에 모여서 상주하는 현상이다. Ion들은 10 volt내외의 전자 beam에 의한 space charge field로 trap될 정도로 속력이 작아서 전자 beam을 따라다니지는 못하고 trap된 근처에 머문다. 특히 자장이 있으면 trap현상이 두드러지게 증가한다. 이 ion이 돌고있는 전자 beam을 교란하여 instability를 유발하며 이도 연구되어야 한다.

3.3 電磁石 과 이의 電源

Lattice가 TBA이어서 한 cell당 3개의 휨자석으로 되어 있다. 이들은 길이 약 1.2m에 1(최고 1.3) Tesla, 4극자석은 그림 4에서와 같이 5가지(10개)로 되어있어 38cm와 52cm이다. 이상 두종류의 전자석은 가동중 자장이 조금이라도 변하면 beam을 잃어버리므로 이들의 전원(직류)의 전류제어가 잘 되어 있도록 설계되었다. 6극 전자석은 2가지 (4개)씩 있고 그 이외에 교정용 2극 자석등 도합 10개 내외가 있다. 전자석은 1mm두께의 연철판을 짜서 만든다. 이 판재료는 두께가 아주 고른 불순물이 0.01%이하인 순도 높은 철판을 포항제철에서 공급받아 punching으로 성형한다. 이들의 자극표면의 모양은 computer를 사용, 연구하여 자장의 불순성분 제거를 극대화 시켰으며 앞으로 실지 자장 측정장치를 써서 개개의 전자석의 자장을 검사하게 된다. 이런 전극연구 능력및 전자석설계 및 측정은 미국 LBL, 일본 RIKEN등으로 연구원의 연수를 통해서 확보되

어 있다. 표면의 정밀도는 $\frac{1}{40}$ mm 이하가 요구된다. 이러한 전자석 및 이의 電源은 거의 천량 국산화를 추진중에 있어 관련 산업체에서 필요한 제작기술을 개발중이다.

3.4 저장링고주파 시스템

저장링의 고주파 시스템은 전자빔이 방사광 복사 때문에 잃는 에너지를 보충해 주는 것이 주목적인데, 적절한 (예를 들면, 10시간 정도)빔의 수명을 유지하기 위해서는 잃는 에너지에 필요한 전압보다 몇배나 큰 전압(이 비율을 over voltage ratio)라고 한다.)을 공급해 주어야 하며 이 비율이 클수록 수명이 길다.

에너지 공급이 실제로 일어나는 곳은 rf cavity이고, cavity에 고주파의 전장을 걸어주어 전자가 통과할 때 가속되는 형식으로 에너지 전달이 일어난다. 이러한 고주파 시스템의 설계에 있어 중요한 것은 고주파의 주파수 선택 및 cavity 형식의 선정이다. 우선 주파수선택과 관련해서 수백 kW의 전력을 계속 공급해줄 수 있는 CW RF 전원이 필요하다. 이러한 용도로 가장 많이 사용되는 것이 klystron인데, 구미 각국 또는 일본에서 쉽게 공급될 수 있는 것은 350MHz 및 500MHz 근처로 한정되어 있다. 이 중에서 가속장치(cavity)의 크기가 작고, 또 전자의 뭉치를 작게 하여 더 짧은 방사광을 얻을 수 있는 500MHz를 PLS의 주파수로 선택하였다.

Cavity 형식에는 한개의 cavity로 된 종류와 여러 개의 cavity로 구성된 종류가 있는데, 각각 임피던스와 Q등의 특성이 달라 후자는 주로 대형가속기에 사용되고 있으며, PLS에서는 일본의 기본설계에 따른 단일 cavity형식을 채택할 예정이다. 그림 7에서 일본의 기본설계에 의한 단면적을 볼 수 있다. 이는 OFHC(특수처리한 구리)로 되어 있으나, cavity한 개당 최대 750kV의 전압이 걸리며 최대 70kW까지의 전력이 소모된다. 이를 냉각시키는 문제, 또한 고진공을 유지하는 문제및 cavity에서 생성되는 Higher-order mode를 어떻게 억제하느냐는 것등이 크게 문제가 된다.

기본설계에 의하면 전자빔의 에너지가 2GeV일때

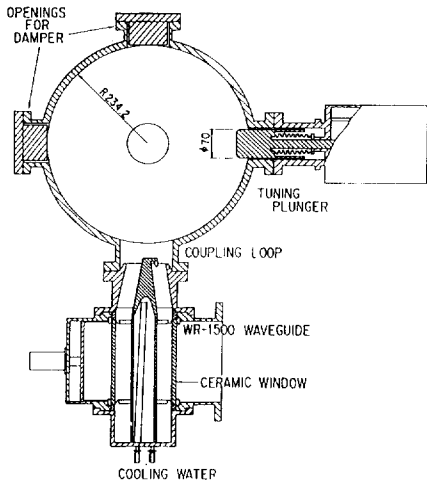


그림 7. RF Cavity 단면도

저장링을 한바퀴 돌때 잃는 에너지는 대략 400KeV 이지만 상기한 over voltage factor로 3.7을 곱한 대략 1.5MV의 전압을 최소한 공급해 주어야 한다. 실제로 저장링에서는 한 beam bunch 내에 있는 두개의 잔자가 서로 Coulomb 산란에 의해 전자의 횡축 방향으로의 운동량이 종축방향으로 옮겨지게 되고, 이로 인하여 bunch내의 개개의 전자의 ring 방향으로의 운동량에 재분포가 일어난다(즉 Δp 의 값이 오 르내린다).

이러한 현상에 의해 빔의 수명이 줄어들게 되는데 이를 Touschek 효과라 한다. Over voltage ratio가 3.7일때 $\Delta P/P \sim 1.5\%$ 정도까지의 변동을 받아들일 수가 있다. 이 값 이상으로 P가 변한 전자는 잃어버린다. 반면 이 이내의 값의 전자는 소위 radiation damping 현상 때문에 ΔP 값이 점점 준다. 실은 Coulomb 산란등에 의한 P의 증가와 radiation damping에 의한 P의 감소가 서로 경쟁상태에 있어서 그 총 결과가 주어진 over voltage ratio에 대응 하는 beam lifetime을 좌우하게 된다. Touschek 효과에 의한 빔의 수명을 늘이기 위해서는 cavity의 전압을 더욱 높이 걸어 주어야 하는데 우리의 경우 2GeV에서 전압이 1.8MV정도 되어야 충분한 빔의 수명을 보장할 수 있다. 이를 위해서는 상기한 cavity system 4개가 필요하다. 고주파 전력용량은 저장링에 저장되는 전자의 갯수(전류)에 따라 달라

지는데 2GeV에서는 전류가 400mA일때 300kW, 2.5GeV에서는 600kW짜리 Klystron이 필요하게 된다. 이러한 고전력 고주파 신호를 Klystron에서 cavity 까지 전달하는 문제도 심각한데, 대형용량의 단일 Klystron에서부터 대형 도파관을 통해 cavity까지 전달하는 방식대신에 소형용량의 Klystron 여러개를 사용, 동축케이블을 사용 여러개의 cavity에 전달하는 방법도 검토하고 있다. 이러한 system은 redundancy등 여러 장점이 있으나, 가격이 비싸고, 또 cavity간의 위상차에 의한 beam의 불안정성 등이 문제가 될 수 있으므로 심사숙고를 요한다.

참고로 radiation damping를 간략히 소개한다. 저장링이 2GeV로 설계되었을 때 이에 상응하는 설계 궤도를 달리는 전자($P=P_0$)는 방사광을 내면서 잃는 energy와 rf cavity 통과시 얻는 energy가 평형을 이룬다. 그러나 이보다 높은 에너지를 가진 전자(예컨대 $P=P_0+\Delta P$)는 방사광복사로 에너지를 잃는 속도(잃는 속도는 에너지 $m_0\gamma c^2 = m_0c^2/\sqrt{1-\beta^2}$ 의 4승에 비례)가 커지고 또한 이렇게 되면 3장에서 기술한 에너지 집속의 원리에 따라 rf cavity에서의 에너지 보충도 작아져서 결국 다시 P_0 로 되려는 경향을 가진다. 이 과정에서 放射光복사가 원래의 운동 방향으로 일어나므로 한 전자가 설계궤도에서 벗어난 궤도를 그리고 있을때 전자파 복사는 이 궤도의 방향을 바꾸지는 않는다. 반면 rf cavity에 의한 energy보충때는 가속이 설계전자의 궤도방향이므로 결과적으로 진폭을 줄인다. 이것을 반복하면서 전자의 궤도가 설계전자궤도에 접근한다.

3.5 진단용 기기 및 가속기 제어

방사광가속기가 전자 Gun, Linac, 운송 및 입사 장치 그리고 저장링등으로 되어 있음을 전술한 바와 같다. 상기 각 부분이 수백개의 기기들로 구성되어 있고 이 전체가 central computer의 지시에 정확하게 따라야만 비로소 전자 beam이 원하는대로 저장 될 가능성이 생긴다. 실제로 제작, 배열 및 동작시의 오차등이 있어서 설령 전자석, rf cavity, 진공시스템등 각종기기가 설계한대로 제작되어 있다고 해도 이것들이 서로 상관을 갖고 정확히 동작을 하는 가에 대해서는 실제의 beam을 가속해서 beam신호

를 직접 관측하지 않고는 판정하기가 어려우며 가속기 운전pattern을 바꿀때나 또는 가속기의 성능을 향상시키기 위하여는 beam의 성질에 대해 정확하고 상세한 관측정보를 얻을 필요가 있다. 따라서 beam의 검출 및 제어는 저장링을 돌고있는 beam의 성질을 해석하는 것과 함께 beam의 안정된 운전등, 가속기의 동작을 종합진단 하는데 중요한 역할을 한다.

한편, 저장링 내의 진공 chamber에 설치된 beam position monitor, DCCT, 그리고 beam line에 설치된 photon beam monitor를 이용하여 저장링 내의 beam의 강도, 위치, 모양, emittance, betatron tune등을 측정할 수 있고, 또한 가속기에 부착된 각종 계측기기를 통하여 power supply 전류, 전자석 전류, RF 전압, 주파수, 위상, 진공도, 온도, 그리고 많은 안전장치신호 등이 측정된다.

이러한 관측된 신호들은 Data acquisition system을 통하여 control computer를 이용하여 display하는 한편 control software는 계획된 가속기운전pattern에 따라 각종 machine parameter들을 설정하고, 적합한 제어신호를 만들어 가속기를 제어한다.

특히 제3세대 가속기 동작에서는 각 기기 부품마다 정밀제어와 beam 궤도 수정을 위한 feedback 제어가 필수불가결하므로 control system 설계시, 계산속도, 용량, 신뢰도, flexibility, 확장성등을 고려해야 한다. PLS control system은 micro-processor를 이용한 실시간 분산제어 방식이며, front-end computer 개념을 도입하여 상부의 host computer 및 console computer와 하부의 micro-processor based local controller를 표준화된 network로 연결하여 제어기능을 분산시켜 효율적으로 가속기를 제어하도록 한다.

3.6 Beamline과 삽입장치(Insertion Device)

광속에 극히 가까운 속도로 달리는 전자가 자기장속에서 휘어질 때 방출되는 방사광은 (그림 8 참조) 파장영역이 넓고 강도가 센 이외에도 고도의 방향성 및 (수직방향의 divergence $1/\gamma$) 전자의 궤도면으로 전기장이 편광되어 있어서 광범위한 분야의 연구에

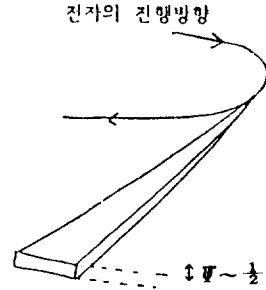


그림 8. 전자가 자장속에서 원운동할 때 방출되는 방사광 분포의 개념도

이용될 수 있다. 이러한 방사광의 특성들은 저장링의 전자에너지(E), 전류의 세기(I)와 휘임자석의 자장세기(B)에 의해 다음과 같이 결정된다. 우선 방사광의 임계에너지(E_c)를 정의하자. E_c 는 방사광의 spectrum에서 이보다 낮은 에너지의 광자(photon)들에 의한 에너지의 합과 이보다 높은 에너지의 광자들에 의한 에너지의 합이 같아지는 값이다.

$$E_c \text{ [keV]} = 0.665 E^2 \text{ [GeV]} B \text{ [Tesla]}$$

방사광의 spectrum은 E_c 근처에서 peak를 이룬 다음 급격히 감소한다. 방사광 진행방향에서 본 방사광의 Spectral Flux의 각밀도는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{d^2F}{d\theta d\psi} \Big|_{\psi=0} [\text{photons}/(\text{sec}) (\text{mA}) (\text{mrad})^2] \quad (0.1\%)$$

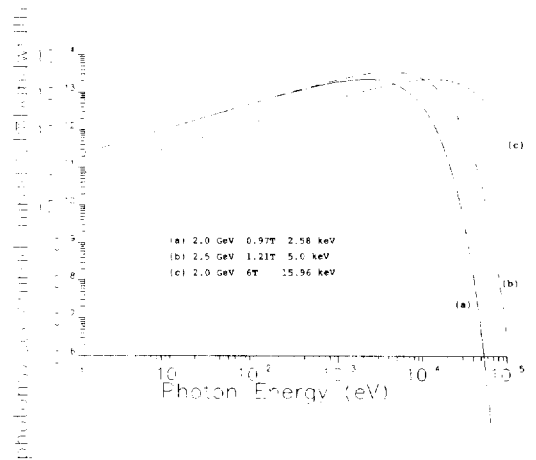


그림 9. 저장링에 300mA의 전류가 흐를때 발생되는 방사광의 Spectral Brightness의 분포

$$\text{Bandwidth}] = 1.327 \times 10^{13} E^2 I y^2 K_{2/3}^2 (y/2)$$

여기에서 θ , ψ 는 각각 진행방향으로부터 측정된 수평 및 수직방향의 각도이며 $y = E(\text{photon})/Ec$ 이고 K 는 제 2종 modified Bessel function이다. 위의 식에 의해 계산된 여러가지 조건하에서의 방사광 spectrum flux의 각밀도가 그림 9에 표시되어 있다. 곡선 (1), (2), (3)들은 저장링에 300mA의 전류가 흐를 때 각각 (1) $E=2.0\text{GeV}$, $B=1.16\text{ Tesla}$, (2) $E=2.5\text{GeV}$, $B=1.43\text{ Tesla}$, (3) $E=2.0\text{ GeV}$, $B=6\text{ Tesla}$ 의 조건 아래에서의 Spectral Flux의 각밀도들을 나타낸다. 이때 각각의 임계에너지는 3.08keV, 5.9keV이다. (1)의 경우 10keV이상의 영역에서는 에너지가 증가함에 따라 광자의 수가 급격히 감소하여 이 영역의 경 X선을 필요로 하는 연구에는 적합하지 못하다. 따라서 PLS는 이 영역의 광자들도 충분히 공급되는 2.5GeV로의 확장이 가능하도록 설계가 진행되고 있다. 2GeV로 가동되는 기간동안 10 keV 이상의 경 X선에 대한 수요는 고자장의 Wiggler를 사용함으로써 만족될 수 있을 것이다. 곡선 (3)은 자장의 세기가 6 Tesla인 3극 Wiggler에 의한 방사광의 Spectral Flux이다. 이 경우 50keV에 이르는 광자까지도 충분한 양만큼 공급이 가능하게 된다.

이러한 Wiggler이외에도 고휘도(High Brilliance)의 방사광을 필요로 하는 연구를 위해 직선부분에

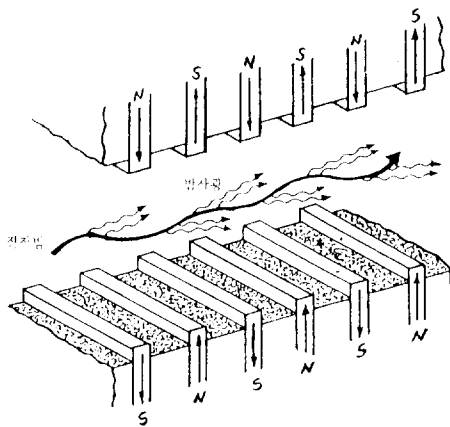


그림 10. 삽입장치속을 전자가 지나갈 때 방출되는 방사광의 개념도

Undulator가 설치될 수 있다. 이러한 Undulator는 그림 10에서 보는 것 같이 전자의 진행방향에 수직으로 2N개의 자석이 배열되어 있어 전자가 진행되면서 좌우로 진동을 함으로써 방사광이 발생하는 장치이다. 자장의 세기를 조절해서 각부분에서 발생하는 방사광들이 간섭이 일어나 특정파장의 광자들만이 강력하게 발생하도록 한 장치가 Undulator이다. Undulator에 의해 발생한 방사광은 특정파장에만 에너지가 몰려 있어서 Beamline의 Optical Element들에게 불필요한 Thermal Load를 줄일 수 있을 뿐 아니라 수평방향의 divergence angle도 간섭에 의해 $1/\sqrt{N}$ 정도가 되어 고휘도의 각밀도를 지니게 된다. 이러한 Undulator의 장점을 살리기 위해 저장링의 emittance를 줄여서 설계한 것이 제3세대 방사광가속기이다. 똑같은 모양의 자석구조를 가지면서 자장의 세기가 강해서 간섭의 효과가 약해지거나 나타나지 않는 것이 Wiggler이다. 이들은 모두 삽입장치(Insertion Device)라 불리우며 저장링의 직선부분에 위치하게 된다.

휘입자석과 삽입장치로부터 발생한 방사광을 실험장치가 위치한 곳까지 운반하여 연구에 활용토록 하는 것이 beamline이다. Beamline은 Frontend, Mirror, Monochromator, 실험장치 그리고 Light Path들로 구성된다. Frontend는 저장링과 beamline의 연결부로서 Mask, Absorber, Fast Closing Valve, Acoustic Delay Line과 beam Shutter로 이루어지며 주요 역할은 beamline에 사고로 인한 Leak가 발생해서 들어오는 공기분자들을 차단하여 저장링의 진공이 영향을 받지 않도록 하는 것이다. 거울은 곡면거울을 사용하여 발산되는 방사광을 집중시켜 보다 더 많은 광자들을 실험장치에 공급하며 VUV beamline의 경우 Low-pass Filter의 역할로 경 X선을 차단함으로써 downstream에 있는 광학부품들에 불필요한 Thermal Load가 걸리는 것을 방지함으로써 열에 의한 광학부품의 변형이나 파손을 방지한다. Monochromator는 방사광으로부터 원하는 파장의 광자들을 분리해 내는 장치로서 VUV 용으로는 Grating Monochromator가 많이 쓰이며 X선용으로는 Crystal Monochromator가 많이 쓰인다. 방사광이 저장링에서부터 실험장치에 도달하기까지의 Light Path는 진공상태 또는 헬륨기체 분

위기로 유지되어야 한다. 만약 방사광이 대기중에 노출되면 강력한 방사광과 공기입자간의 산란에 의한 radiation 때문에 인체에 치명적인 위해를 가하므로 이를 방지하기 위한 interlock system을 완벽하게 갖추어야 한다.

Beamline을 사용하는 실험의 종류에 의해서 해당 beamline의 사양이 결정된다. 따라서 PLS의 다른 어떠한 부분보다도 beamline은 설계단계로부터 의견이 반영되어야 한다. 포항공대의 PLS건설추진반에서는 사용자의 의견을 반영하기 위해 사용 희망자들로부터 방사광을 이용한 연구과제 요약서를 계속 접수하고 있으며 현재까지 접수된 과제들의 분류는 표 1과 같다. 이 표에서 보는 것과 같이 국내 여러분야의 과학자들이 방사광 사용에 관심이 있으며 이러한 관심은 앞으로 방사광에 대해 이해가 널리 전파될수록 더욱 증대될 것으로 예상된다.

지금까지 접수된 과제들을 근거로 하여 작성한 beamline의 사양은 표 2와 같다. 이 표는 확정된 것이 아니며 앞으로 상세설계가 진행되면서 사용 희망자들의 의견을 계속 반영시키는 과정에서 각 beamline이 우선순위와 사양이 확정될 것이다. 현재로서는 4개의 beamline을 PLS의 건설과 병행하여 건설할 계획이며 이외에도 정부 출연연구소, 대학, 기업체연구소등의 외부전용 beamline들의 추가건설

표 1. 접수된 과제들의 분류

• 과장영역 및 실험기법별 분류

구분	에너지(keV)	실험기법	과제수
VUV/연X선	0.01-0.3	Photoemission	6
	0.5 -2	SEXAFS	2
	0.5 -3	Lithography	2
경X선	6- 11	Surface Diffraction SAXS	1 1
	3 -20	Diffraction, Crystallography	4
	5 -35	Topography	2
	10-30	EXAFS	10

• 분야별 분류

구분	화학	물리	화공	재료	전자공학	고분자	생명과학	계
과제수	10	6	6	2	2	1	1	28

표 2. 건설예정인 Beamline의 대략사양.

휘임자석 Beamline

- VUV/연 X선 { photoemission
SEXAFS
- 경 X선(10 KeV) { Diffraction Crystallography,
EXAFS
SAXS

Wiggler Beamline

- 경 X선(50 KeV) { Diffraction, EXAFS
Topography

Undulator Beamline

- VUV/연 X선 : 사양미정

이 기대된다. 특히 256MDram 이상의 VLSI 제작기술개발을 위한 X선 Lithography용 beamline의 건설은 시급할 것으로 보인다.

4. 결 론

포항공과대학에 세워질 2GeV 방사광 가속기는 포항제철에서 출연한 740억원의 건설자금으로 1988년 4월에 방사광 가속기건설 추진본부를 설립, 정식으로 출범하였다.

제3세대형인 방사광가속기에는 초자외선(VUV)은 물론 경 X-ray 까지의 광범위한 파장영역에서 광속밀도가 대단히 높은 방사광을 공급하게 된다. 더우기 이 방사광의 emittance가 아주 작아 건설후에는 방사광을 이용한 연구를 통해서 산업공학, 생명공학, 의학, 응용과학, 기초과학등의 발전에 크게 이바지할 것으로 기대되고 있다.

한편 가속기건설 연구를 통해서 국내에 가속기물리 분야의 뿌리를 내리고 또 가속기 건설에 수반되는 각종부품의 국산화등을 통해서 이 계통의 첨단기술을 습득하는 기회가 될 것이다. 현재 20만평의 부지구매가 거의 완료되었고 7월에는 착공식과 더불어 부지조성이 시작될 것이다.

현재 가속기 자체의 개념설계가 진행중이며 금년 하반기부터는 상세설계가 시작될 예정이다. 그후 발주, 설치 및 시운전의 단계를 거쳐 1993년 10월에는 가동을 시작할 계획이다.

참 고 문 헌

- 1) Winick H. Properties of Synchrotron Radiation in Synchrotron Radiation Research edited by Winick H, and Doniach S, 1980 Plenum, New York
- 2) 1-2 GeV Synchrotron Radiation Source, 1968, IBL Report PUB-5172