

포항 방사광가속기(PLS) 설치계획 및 전망



이 기 봉
포항공과대학
가속기연구소 교수

I. 서론

빛은 기초과학 및 응용기술 분야에서 오랫동안 널리 이용되어 왔으며 최근들어 원자 및 분자규모의 현상에 대한 연구 또는 이를 이용한 응용 등에 필요한 파장영역(0.5~100 Å)의 빛을 공급할 수 있는 광원이 절실하게 필요하게 되었다. 기존의 광원으로는 이 파장영역의 빛을 공급 하기에 적당치 않았음에 반하여 입자가속기에서 발생하는 방사광은 이러한 파장영역의 빛을 레이저에 버금갈 정도의 세기로 공급하여 줄 수 있을 뿐 아니라, 그밖에 광원으로서 갖추어야 할 여러가지 장점들을 갖추고 있어서 미래 기초과학 연구 뿐 아니라 산업계에도 막대한 파급효과를 미칠 것으로 예상되고 있다. 이러한 방사광의 중요성 때문에 미국, 일본 및 유럽의 선진 제국들은 1970년대부터 방사광전용 가속기를 건설 가동시켜오고 있으며, 입자물리 또는 핵물리용으로 건설된 가속기들도 방사광용으로 전용하여 사용하고 있는 실정이다.

또한 21세기 과학기술의 주도권을 확보하기 위하여 제3세대 방사광가속기건설을 진행 또는 추진중에 있으며, 이러한 방사광가속기의 건설은 선진국에 국한된 것이 아니라 중

국, 대만, 인도 및 브라질 등 개발도상국에서도 건설이 이미 완료되었거나 추진중에 있다.

국내에서는 포항공대에서 제3세대 방사광가속기 건설을 1987년부터 준비되어 오다가 1991년 4월 1일 포항 방사광가속기 착공식을 갖고 본격적으로 건설에 착수케 되었다. 본 세미나에서는 방사광의 특성, 포항방사광가속기의 구성 및 건설계획에 대하여 설명코자 한다.

II. 방사광의 특성

방사광이란 전자가 빛의 속도에 가까운 속도로 진행하다가 방향을 바꿀 때에 전자의 진행방향으로 방출되는 강력한 빛이다. PLS의 경우, 20억 전자볼트(2 GeV)의 에너지로, 가속된 전자의 속도는 광속의 약 0.99999997배가 된다. 가속기에서 방출되는 방사광은 다음과 같은 특성들을 지니고 있다.

- 1) 강력한 세기(High Intensity)
- 2) 넓은 파장영역(Broad Spectrum)
- 3) 편향성(Polarization)
- 4) 펄스시간구조성(Pulsed Time - Structure)

5) 높은 지향성(Good Collimation)

방사광의 세기는 고전전기역학을 사용하여 계산할 수 있다. 고전전기역학에 의하면 질량 m , 전하 e 인 입자가 반지름 R 이고 에너지가 E 인 원운동을 할 때 방출하는 방사광의 일률(Power)은 다음과 같다.

$$P = (2/3) (e^2 CE^4 / R^2 m^4 C^8) \dots\dots\dots (1)$$

즉, 방출되는 일률은 입자 에너지의 4제곱에 비례하고 입자질량의 4제곱에 반비례하기 때문에 질량이 작은 입자일수록 방사광으로 방출되는 에너지가 많아진다. 따라서 모든 방사광가속기에는 질량이 가장 작은 하전입자인 전자가 사용된다. 에너지 $E(\text{GeV})$ 로 가속된 전자들이 $i(\text{mA})$ 의 전류로 저장링을 회전할 때 자기자의 세기가 $B(\text{T})$ 인 휘임자석(Bending Magnet)에서 회전운동을 하며, 방출하는 방사광의 일률은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P(\text{kW}) = 0.0265 E^3 B i \dots\dots\dots (2)$$

PLS의 경우 2 GeV의 전자들이 100mA의 전류로 저장링에서 회전하고 있을 때 자기장의 세기가 1.06T인 휘임자석에서 방출되는 방사광의 일률은 22.5kW에 달한다.

방사광 세기의 파장에 따른 분포는 광자(Photon)의 Flux, $N(h\nu)$ 로 나타낸다. 이때 방사광의 파장특성을 나타내는 지수가 임계에너지(Critical Energy)인 $H\nu_c$ 이다. 임계에너지는 임계에너지보다 작은 에너지를 갖는 빛의 에너지총합과 임계에너지 이상의 에너지를 갖는 빛의 에너지총합이 같도록 정의되며, 그 크기는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$h\nu_c (\text{keV}) = 0.67B(\text{T}) E^2 (\text{GeV}) \dots\dots (3)$$

또한 방사광의 세기를 나타내는 Flux의 파장별 분포는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$\gamma = E/mC^2$$

$$y = h\nu/h\nu_c$$

$$G_1(y) = y \int_y^\infty K_{5/3}(t) dt$$

$$N(h\nu) = 1.256 \times 10^7 (E/mC^2)^3 G_1(y) \text{ (개/}$$

$$\text{sec. mrad. mA}) \dots\dots\dots (4)$$

이때 $h\nu$ 는 빛의 에너지이고 $K_{5/3}(t)$ 는 제2변형 Bessel 함수이다.

PLS의 파장에 따른 방사광의 Flux는 그림 1에서 보는 바와 같다. 임계에너지의 3~4배 이상의 에너지를 갖는 광자의 수는 급격히

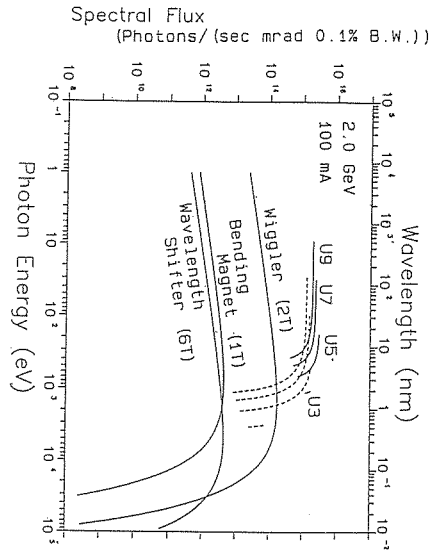


그림 1. PLS 방사광의 파장별 Flux

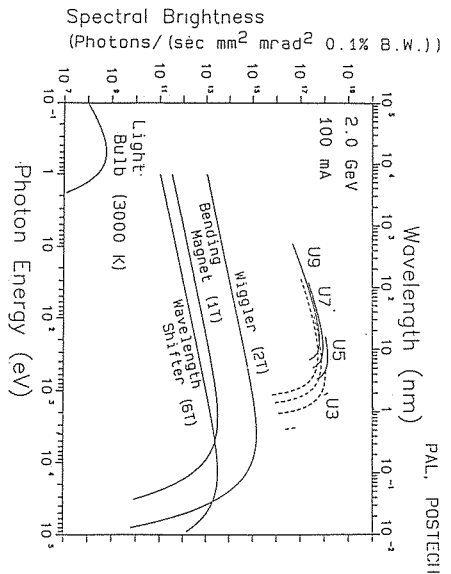
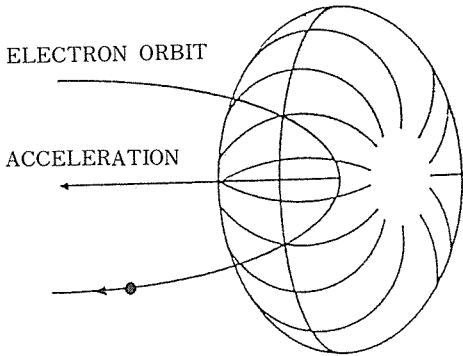
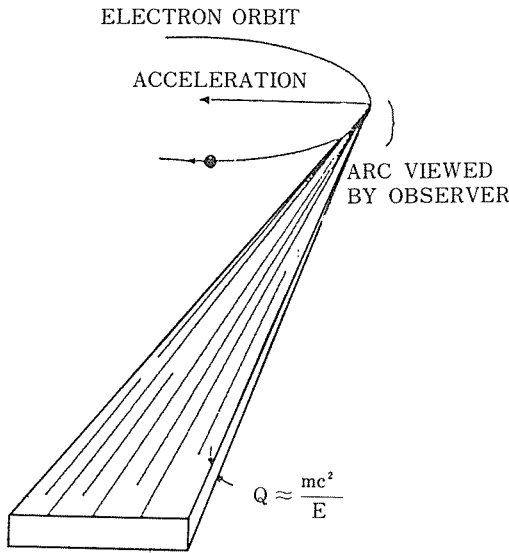


그림 2. PLS 방사광의 파장별 Brilliance



CASE I: $\frac{V}{C} \ll 1$



CASE II: $\frac{V}{C} \approx 1$

그림 3. 전자의 진행속도의 크기에 따른 방사광의 방출 방향

감소함을 알 수 있다.

방사광의 세기를 나타내는 지표의 하나로써 Brilliance 또는 Spectral Brightness가 있다. 이것은 방사광의 Flux를 광원의 크기가 각 분산으로 나누어 준 양으로서 광원의 휘

도를 나타낸다. PLS와 기존의 광원들과의 Brilliance는 그림 2에서 보는 바와 같다. 방사광은 기존의 어느 광원보다 넓은 영역에서 매우 강력한 세기의 빛을 공급하여 주고 있음을 알 수 있다.

방사광의 방출방향은 그림 3에서 보는 바와 같이 전자의 속도와 관계가 있다. 전자의 속도가 빠르지 않는 경우에는 고리현상으로 방사광이 방출되는 반면, 전자의 속도가 광속에 접근함에 따라 방사광의 방출방향은 전자의 진행방향으로 집중되어 전자의 운동방향으로부터 $1/\gamma$ 의 각도내에서 방출된다. 따라서 방사광은 고도의 지향성을 지니고 있음을 알 수 있다.

저장링에서 전자들은 연속적으로 회전하는 것이 아니라 뭉치(Bunch)로 모여서 회전하고 있다. 이때 뭉치의 길이(Bunch Length)는 저장링의 고주파 장치의 주파수에 의해 결정된다. PLS의 경우 약 500 MHz의 고주파장치를 사용할 예정이며 뭉치길이는 약 0.7mm가 될 것으로 예상된다. 이러한 전자뭉치들로부터 방출되는 방사광은 약 0psec의 펄스길이를 갖게 될 것으로 예상되어 nano-second (10^{-9} sec) 이하의 시간분해능을 갖는 시간분해 분광학(Time-resolved spectroscopy)의 측정을 가능케할 것이다.

III. PLS의 구성 및 건설계획

PLS의 선형가속기와 저장링으로 구성되어 있다. 선형가속기는 전자를 발생시켜 2 GeV 까지 가속하여 저장링에 입사시키는 역할을 한다. 165m 길이의 선형가속기에는 전자를 가속시키는 가속관이 지하 6m의 터널에 위치하고 있으며 지하터널 위 지상건물에는 가속관에 에너지를 공급하기 위한 Klystron과 Modulator가 위치하게 된다. 저장링은 선형가속기에서 가속된 전자들을 일정한 에너지를 유지하면서 회전운동을 시켜 방사광을 방출하며 이 방사광을 이용하여 여러가지의 측정들을 수행하는 부분으로서 PLS의 핵심이라 할 수 있다. 저장링의 둘레는 280m이며

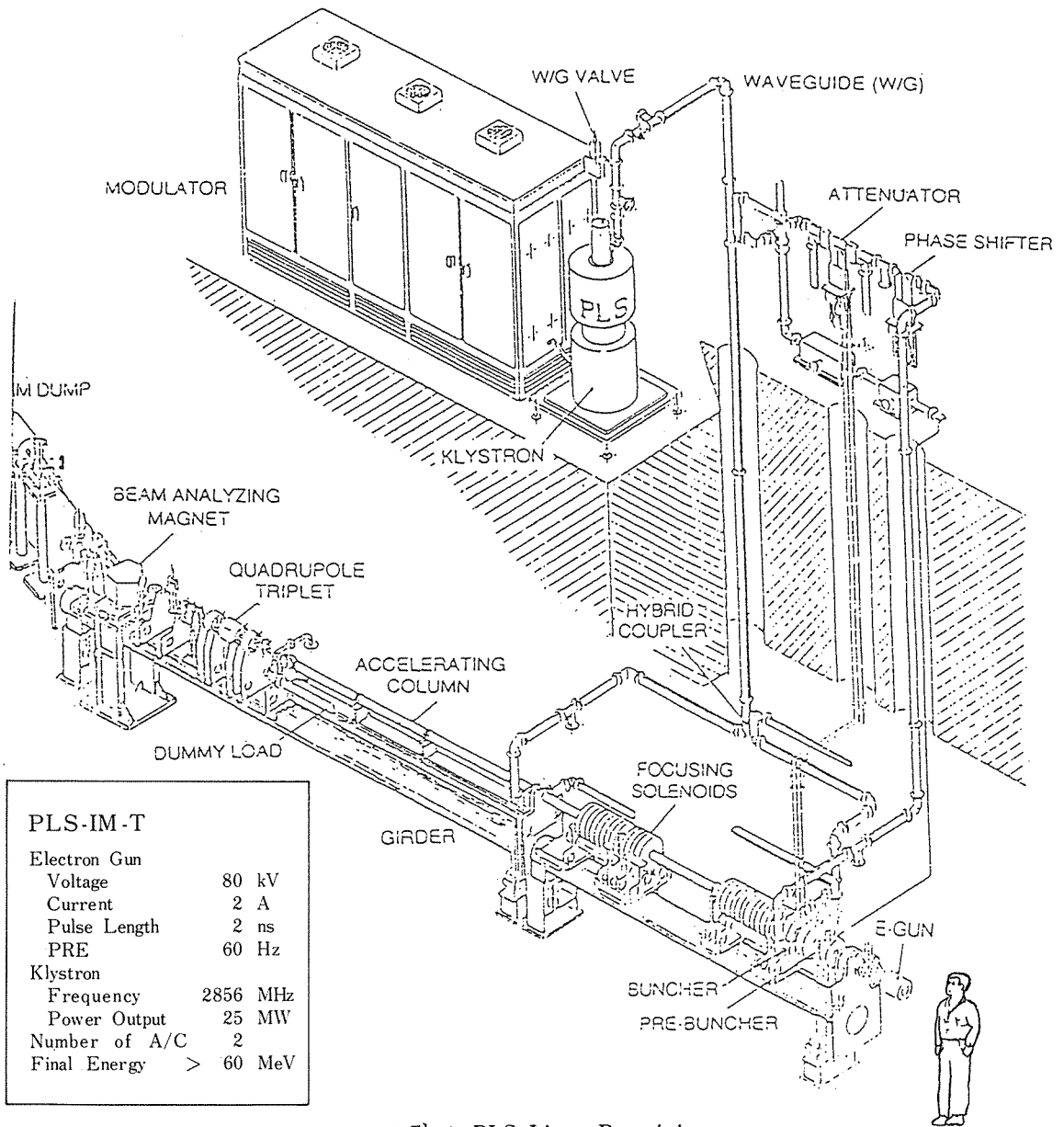


그림 4. PLS Linac Pre - injector

36개의 휘임자석에서 방사광이 방출되고 위 글러, 언들레이터 등의 삽입장치를 가설할 수 있도록 설계되어 있다. 본 부분에서는 PLS의 선형가속기의 저장링 및 부대시설에 대해 좀더 구체적인 설명을 하고, 동 시설 건설계획에 관해 언급코자 한다.

1. 선형가속기

PLS의 선형가속기의 가속에너지는 2 GeV이며 고주파장치의 주파수는 2,856 GHz이다. 선형가속기는 전자를 발생시켜 60 MeV까지 가속시키는 Preinjector와 Preinjector에서 가속된 전자들을 2 GeV까지 가속시키는 본체

부분으로 구성되어 있다.

Preinjector는 그림 4에서 보는 바와 같이 전자를 발생시키는 전자총, S-band prebuncher와 S-band buncher 및 2개의 가속관과 기타부품들로 구성되어 있으며, 25 MW Klystron에 의해 에너지가 공급된다. 전자총은 3극(Triode) Type이며 전자총에서 발생하는 전류는 2A이다.

Preinjector는 중국 IHEP와의 국제협력 하에 제작중이며 모든 부품은 포항에 도착되어 있고, '91년 7월부터 설치에 착수할 예정이다.

Preinjector에서 가속된 60 MeV 전자들은 선형가속기 본체에서 2 GeV까지 가속된다. 선형가속기 본체는 10개의 Klystron과 10개의 Pulse Compressor에 의해 가속에너지가 공급되며 이때 Klystron의 최대출력은 80 MW이나 65 MW의 출력으로 운용될 예정이다. 각 Klystron에는 1대의 Pulse Compressor와 4개의 가속관이 연결되어 있다.

가속관은 SLAC 타입의 Constant Gradient 구조를 하고 있으며 길이가 3.07m이고, 각 가속관들은 conflat flange들로 연결된다. 한편, 전자를 계속 집속시키기 위하여 3개의 4극전자석으로 이루어진 광학계(Quadrupole Triplet)가 6개 사용된다. 또한 80MeV, 1000 MeV, 2000MeV되는 지점에 각각 휘임자석을 설치하여 가속된 전자의 상태를 짐작할 수 있을 뿐만 아니라 여러가지 다른 목적으로 활용할 수 있도록 할 계획이다.

2. 저장링

저장링은 전자가 지속적으로 회전운동을 계속하면서 방사광을 방출하는 전자들의 공기분자들과 충돌하지 않도록 전자의 통로에 진공을 유지하는 진공관을 비롯한 진공설비, 전자의 진로를 유도하는 자석과 이들의 전원 공급장치, 그리고 에너지를 계속 공급하기 위한 고주파장치들과 이들 장치들을 제어하는 제어장치들로 구성된다.

PLS의 저장링은 제3세대 방사광가속기로

서의 성능을 발휘하기 위해 12개 주기를 갖고 있으며, 저장링 속에서의 전자물치의 크기를 나타내는 emittance는 12nm. rad이 된다.

PLS 저장링의 각 주기는 TBA 자석격자를 이루고 있으며 3개의 휘임자석(자장세기 1.06T)과 12개의 4극자석, 6개의 6극자석들로 전자의 운동을 유도한다. 이들 자석들의 자장은 고도의 정밀성을 유지하도록 요구되며 특히 휘임자석의 경우가 일만분의 일 이하가 되어야 한다. 현재 휘임자석과 4극자석의 시제품이 현대중전기에서 제작되고 있으며, 자석제작용 소재인 전기강판은 포항제철에서 특별히 개발, 생산된 바 있다. 또한 자석들에 전원을 공급하는 전원공급장치는 포항공대에서 개발하여 대우중공업에서 시제품을 제작한 바 있는데, 외국제품보다 효율성, 전류의 안정성이 뛰어나고 가격이 저렴하여 포항 방사광가속기의 건설을 통한 자석 관련 기술의 국내축적이 이루어져 미래 자기부상 열차의 건설에 필요한 국내기술개발이라는 부수적인 효과도 기대되고 있다.

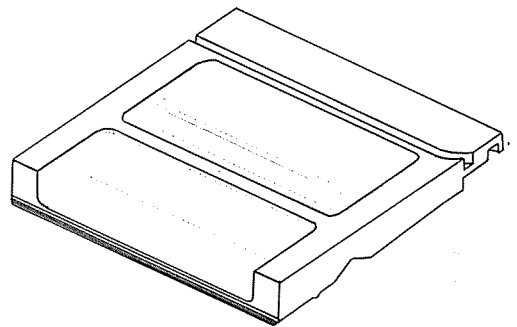
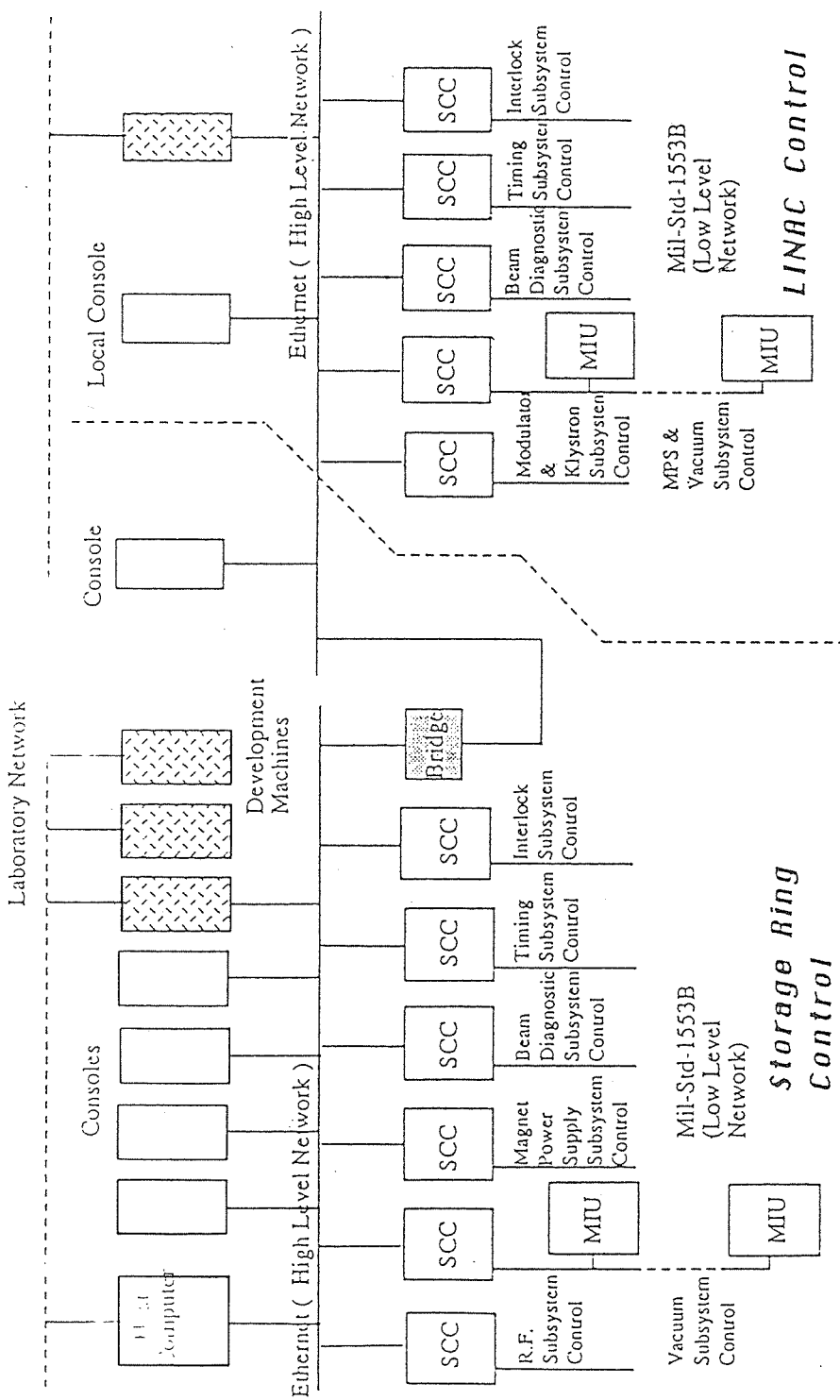


그림 5. PLS 진공관의 4극자석부분 조감도

진공관은 알루미늄 합금으로 제작될 예정이며, 그림 5에서 보는 것같이 Pole-shape에 맞추어진 모양으로 가공되어야 한다. 저장된 전자의 lifetime을 5시간 이상 유지하기 위하



SCC : Subsystem Control Computer

MIU : Machine Interface Unit

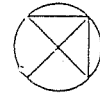
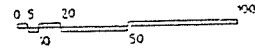
PLS Control System Architecture

그림 6. PLS 컴퓨터 제어장치 계통도

GENERAL LAYOUT

SCALE

UNIT : METER



- (1) K&M TEST ROOM
PART DELIVERY
- (2) LINAC CENTER
BLOG.
- (3) KLYSTRON GALLERY
- (4) LINAC COOLING
PUMP STATION
- (5) LINAC ELEC. S/S
- (6) BTL POWER SUPPLY
ROOM
- 1. RF BLDG.
- 2. SUPER DOOR
- 3. SERVICE MODULE
- 4. PERIPHERAL LAB
& OFFICE
- 5. S.R. ELEC. S/S
- 6. S.R. MPS BLOG.

SLOPE

MAIN
SUBSTATION

UTILITY
BUILDING

SUPPORT
BUILDING

TECHNICAL
BUILDING

STAFF
BUILDING

그림 7. PLS 건물 Layout

여 진공관내의 진공도는 10^9 Torr 이하의 초고진공을 유지하여야 한다. 현재 진공관의 개념설계는 완료 되었으며 대우중공업 항공사업부가 시제품 제작을 위해 협의가 진행중이다.

저장링 속 전자에 에너지를 공급하는 고주파장치는 500.082MHz의 주파수로서 Peak RF Voltage는 2 MV이며 60 kW Klystron 4개가 각각 1개의 RF Cavity에 에너지를 공급할 예정이다. Klystron과 Cavity 사이는 동축케이블로 연결할 예정이다. 고주파장치의 개념설계는 완료되었고 Cavity의 모델이 제작되어 시험중이다. 고주파장치의 거의 모든 부품은 외국에서 구입될 예정이다.

PLS의 컴퓨터제어장치시스템은 그림 6에서 보는 것과 같다. 제어장치시스템은 저장링의 상태를 감지하는 진단계와 저장링의 가동을 제어하기위한 컴퓨터 제어계로 분류된다.

가속기의 저장링본체를 구성하는 상기 설비들 이외에도 방출되는 방사광을 이용하여 측정을 하는 빔라인이 설치될 것이며 PLS에는 60개 이상의 빔라인을 설치할 수 있으나, 초기에는 X선 및 진공자외선 빔라인을 각 1대씩 설치 할 예정이다.

저장링건물은 그림 7에서 보는 것처럼 저장링이 위치하고 있는 저장링터널, 실험공간 및 연구실, 실험준비실 등이 위치할 연구동으로 구성되어 있으며, 저장링터널은 저장링속의 전자에서 발생하는 방사선을 차단하기 위하여 강화 콘크리트로 된 차단벽으로 외부와 격리되어 있다. 이밖에 행정동, 기술동, 지원동 및 기계동 등 연구 지원시설을 위한 건물들이 있다. PLS 가동에 필요 전력공급을 위한 수배전설비는 '92년 9월까지 완료되면 선형가속기는 '93년말, 저장링은 '94년 말까지 각각 건설을 완료하여 '95년부터는 국내외 방사광사용 희망자에게 개방하여 국내 기초과학 및 산업계의 방사광이용 수요에 부응할 계획이다.

현재 국내에서 방사광을 익용하려는 Potential User의 수요는 30 여명에 이르고 있으나 그 수가 급격히 증가하는 추세이다. 외국

에서 방사광의 이용이 넓게 확산됨에 따라 현재는 외국에서의 방사광이용경험자들이 Potential User의 대부분을 차지하고 있으나 국내에서도 방사광 이용에 많은 분들이 관심을 표명하고 있으며 X선 Lithography에는 반도체산업계가 깊은 관심을 갖고있고, X-ray Subtraction Angiography에는 의학계에서 관심을 갖고 문의하고 있다.

따라서 PLS 완공 후 이의 효과적인 활용을 기하기 위하여 당 연구소에서는 사용자연수계획을 수립하여 국내의 방사광 이용희망자에게 외국 방사광가속기에서의 이용경험을 습득시키는 Program을 운영하고 있다. 현재 전망으로는 PLS가 완공되면 '94년말경 국내외 약 130 여명 이상의 박사급 연구인력이 PLS User로 확보될 전망이다. 그들의 소속분야는 물리, 화학 등 기초과학에서 화공, 생명공학, 재료 등 공학분야는 물론 반도체, 화학회사 등의 산업계와 의학계가 망라될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", Wiley, 1975
2. H. Winick in Synchrotron Radiation Research, ed. H. Winick and S. Doniach, Plenum Press, 1978
3. Pohang Light Source Conceptual Design Report, 포항공대, 1989
4. W. Namkung, M. Cho, I. S. Ko, Y. X. Luo, C. Ryu, S. Won, and T. N. Lee, "Status of PLS 2 GeV Lianc Project", 1991