

# 포항 방사광 가속기 선형입사장치 전산제어시스템 개발개념

유 창 모

(포항공대 물리학과 연구조교수)

## 1. 서 론

포항공대에서는 현재 1993년을 목표로 2 GeV 에너지의 제 3세대 synchrotron 방사광 가속기를 설계 중에 있는데 이 Synchrotron Storage Ring에 전자 빔을 넣어주는 입사장치로서 2 GeV full energy linear accelerator를 구상하고 있다. 이 linear accelerator (linac)의 control system은 전체 방사광 가속기의 일환으로서 처음부터 중앙집중 방식으로 구성할 수도 있으나, linac과 storage ring이 작동방법이 다른 점, 물리적으로 떨어져 있다는 점, linac의 경우 부분적 commissioning이 연차적으로 가능하다는 공정상의 차이 등에 의해 storage ring의 control system과는 상당히 독립적으로 제작될 수 있다. 본 논문에서는 PLS (Pohang Light Source)의 linac의 control system을 분산 시스템의 개념하에서 개발하는 입장에서 그 기능적 요구조건을 분석해보고 그에 따른 시스템 설계 및 추진전략에 대해 개괄적으로 기술해 보고자 한다.

## 2. Linac의 구성요소

현재 포항공대에서 구상하고 있는 선형 가속기는 R. F. Cavity에 traveling wave를 보내어 그

electric field 성분을 이용해 전자 혹은 양전자를 가속시키는 R. F.형 가속기이다. R. F. linac의 근본 원리는, traveling electromagnetic wave 안에서 만약 electron이 wave와 같은 속도로 움직이고 있으면 electron은 움직이는 동안 일정크기의 electric field를 마치 두개의 conducting plane 사이에 있는 것처럼 보게 되어 가속이 가능케 된다는 것이다. 즉, 빠른 속도로 oscillating하는 electromagnetic wave에서도 전자와 빔의 phase가 올바르게 맞추어질 수 있다면 전자는 가속될 수 있다는 것이 R. F. linac의 기본원리이다. 이러한 개념을 실질적으로 구현하는 것은 단순한 일은 아니며, 이를 위하여 linac은 다음과 같이 복잡한 부속 시스템으로 구성된다.

- (1) gun-전자빔을 최초로 발생시키는 장치
- (2) bunching system-전자빔을 가속시키기 좋게 끊어서 모아주는 장치
- (3) accelerating structure-전자빔을 가속시키는 장치로서 accelerator의 본체라 말할수 있다.
- (4) girder-accelerating structure를 지탱해 주는 장치
- (5) klystron-accelerating structure에 전자파를 공급하는 장치
- (6) wave guide system-klystron에서 accelerat-

- ing structure까지 전자파를 보내는 장치
- (7) modulator-klystron에 power를 공급하는 전원장치
  - (8) R. F. driver 및 phasing system-linac의 klystron들에 일정한 frequency를 보내고 beam과 R. F. wave가 일정한 phase 관계를 유지하게 하는 장치
  - (9) focusing & steering system-전자빔의 폭이 넓어지거나 accelerating structure의 중심축에서 벗어날 때 수정해 주는 장치
  - (10) vacuum-accelerating structure와 wave guide 시스템을 고진공으로 유지시켜주는 장치
  - (11) cooling water system-linac 구성요소들의 작동온도를 일정하게 유지시켜 주는 장치
  - (12) instrumentation 및 control system-전자빔, R. F. wave 및 앞의 여러장비의 상태를 감시하고 제어하는 장치

Linac는 크게 gun 및 bunching system을 포함한 injector 부분과 나머지 accelerator 부분으로 나눌 수 있으며 이들 accelerator 부분은 같은 장비들이 반복되는 특징을 지닌다. 그림 1에 이들 accelerator 부분의 부속 시스템 및 그들의 관계를 보여주는 block diagram을 나타내 보였다. 전자빔의 가속을 위해서는 이들 주요 부속시스템들은 상당히 정밀하게 가공 제작되어 엄격한 허용치 안에서만 작동 되어야 한다. 약간만 허용치를 벗어나도 전자빔은 가속되지 않고 사라져 버린다는데 가속기 기술의 어려운 점이 있으며 I & C system은 이 허용치 안에 작

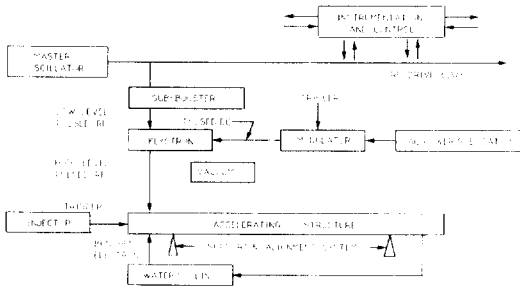


그림 1. Linac 구성도

동을 유지시키는데 주 목적을 가진다. 다음 장에서는 PLS Linac의 주요 부속시스템의 작동 허용치를 기술코자 한다.

### 3. PLS Linac description

PLS에서는 positron option을 갖는 electron linac 시스템을 고려하고 있다. Linac의 총 길이는 Positron option을 포함해서 220m이다. 그러나 Positron option은 방사광 가속기의 storage ring이 완성될 때까지는 실현시키지 않을 계획이다. Klystron은 40 MW 이상의 것이 16개가 쓰일 예정이다. 그밖의 주요설계 parameter는 표 1과 같다.

PLS Linac은 건설공정 및 Commissioning의 편의상 3 sector로 나눌 수 있는데, 현재 계획된 공정은 100 MeV의 electron을 얻어내는 injector sector를

표 1. PLS Linac 주요설계 parameter

Beam energy (GeV)	2
Energy spread	±0.8%
Beam pulse length (ns)	2
Repetition rate (pps)	60
Pulse beam current (A)	>1
Emittance (MeV/c cm)	0.015π
Accelerating gradient (MeV/m)	16.7
RF pulse length (μs)	1.5—4
Operating mode	2/3π
Accelerating structure (m)	3.05
Number of section	56
Gun voltage (KV)	120
Gun current (A)	>8

표 2. Master Oscillator Specification

Frequency	2856.0 MHz
Frequency stability	2 × 10 <sup>-7</sup> /day
Tuning range	±0.05 MHz

먼저 건설하고 차례로 두개의 약 80m 길이의 1 GeV 가속 sector를 짓는 것이다. 연차적 공정에서 얻어지는 경험과 기술은 그 다음 단계의 시스템개발에 도움을 주리라 생각한다. Positron option이 실현되는 경우는 injector sector가 앞으로 더 옮겨지고 이 injector와 다음 가속 sector 사이에 250 MeV electron Booster와 Positron injector가 놓이게 된다.

각 sector 끝에는 beam 분석장치들이 놓이게 되는데 이것들은 Commissioning 기간중에는 Beam 성질 및 가속기의 동작을 분석하는데 쓰이고 Linac이 완성된 후에는 다른 물리적 실험을 위해 쓰일 예정이다.

즉, PLS Linac 시스템은 Beam 분석장치를 포함하여 비슷한 성격의 sector들을 연차적으로 완성하는 형태로 건설되며 이러한 공정은 distributed computer control이 자연스럽게 구현될 환경을 제공한다.

PLS Linac control System은 Linac의 여러 부속 장비들이 적당한 허용치 내에서 작동하는지 감시하고 제어하는 기능을 하는데 이중 주요 부속장비들의 작동범위는 다음과 같다.

(1) RF Drive System

RF Drive System은 0.8 W(CW) 출력의 master oscillator와 RF signal을 600 W로 증폭시키는 프리앰프로 구성된다. Master oscillator의 spec.은 표 2와 같다.

(2) Waveguide System

고출력 transmission network를 위해 표준 S-band 약 5mm 두께의 두꺼운 벽 OFHC Waveguide가 사용된다. Waveguide의 단면적은 72×34mm이 된다. Klystron의 고출력 때문에 Waveguide System은 진공이 유지되어야 하는데 full-power일 때에는  $2 \times 10^{-7}$ Torr 이하로 유지되고 zero-power일 때에는  $5 \times 10^{-8}$ Torr이어야 한다.

Waveguide의 안정된 phase length를 얻기 위해 첫번째 power가 갈라지는 곳과 accelerating structure의 작동온도는  $45^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지되어야 한다.

(3) Accelerating Structure

각 accelerating structure로부터의 최대 잉여출력은 약 3MW(pulse)와 540W(평균)이다. 이 출력은

표 3. Accelerating Structure의 특성

RF configuration	contant gradient, TW
Operating frequency	2856±0.2 MHz
Operating temperature	45.0±0.3°C
Number of cavities	86
RF phase shift per cell	120±2.5°
Filling time	0.83μs
Shunt impedance	53 MΩ/m
Group velocity	0.02-0.0065
Attenuation parameter	0.57

물에 냉각된 고출력 부하에 흡수된다. 냉각수의 온도는 35°C이다. Accelerating Structure의 작동특성은 표 3과 같다.

(4) Vacuum System

Vacuum은 beam이 분자들과 산란에 의해 없어지는 것을 방지하고, 방전을 방지하며 klystron window를 보호하는 중요한 역할을 한다. Linac의 vacuum 요구조건은 다음과 같다.

-Accelerating Structure의 중심부의 압력은  $5 \times 10^{-7}$  Torr 일것.

-Klystron의 window의 압력은  $5 \times 10^{-8}$ Torr 일것.

-Electron Gun의 압력은  $5 \times 10^{-8}$ Torr 일것.

(5) Cooling Water System

가속기의 RF power의 대부분의 에너지는 열로 다시 흡수된다. 냉각계통은 열을 흡수하고 가속기의 부품들이 열팽창에 의한 오동작이 일어나지 않도록 하는 중요한 역할을 한다. Cooling water 시스템은 accelerating structure cooling water, klystron cooling water 및 온도조절의 세 부속시스템으로 구성된다. Accelerating structure는 열에 대해 상당히 민감하며 온도는  $45.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 에 유지되어야 한다.

각 structure의 최대 열부하는 약 2.7KW이다. 냉각수 안의 온도상승은 1°C 이하이며 따라서 accelerating structure를 따른 온도변화율은 무시할만하다.

4. PLS Linac Control시스템 요건

PLS Linac의 Control 시스템은 Linac의 특성으로

인하여 다음과 같은 제약요건을 받는다.

물리적 제약요건으로는,

- (1) Linac는 작동중 고방사능 X-ray를 방출하기 때문에 지하 4m 이하에 위치하여야 하며 작동 중에는 접근이 불가능하다. 따라서 유지보수를 요구하는 장비, 특히 작동 중에 조절을 필요로 하는 전자장비나 Klystron 같은 것들은 지상건물에 위치하여야 한다. 그리고 장비는 가능하면 self-protecting 및 self-resting 할 수 있는 기능이 있어야 한다.
- (2) Linac의 총 길이는 빔분석 스테이션 (beam analyzing station)을 포함하여 220m 이하이고 3 sector로 나누어 진다. Sector 간에 요구되는 기능들은 유사한 점이 많다.
- (3) Linac 근방에는 고출력 Modulator나 Klystron 같은 noise원이 많다. 이 noise가 computer control에 문제를 일으킬 위험이 많이 존재하므로 noise를 제거, 억제할 수 있는 방법들이 조심성 있게 강구되어야 한다.

운영상의 제약요건으로는, Linac이 완성된 후에는 main control이 Linac control room에서 수행되고 storage ring control room에서 이 수행사항을 알 수 있어야 한다. Local control system들은 main control system을 보충하는 역할을 수행한다. Sector별 완성기간에는 local control room들에서 빔과 장비들을 제어하지만 결국은 전 3 sector에 대한 종합적인 정보, trigger equipment, 냉각수탑, 방사능 감시결과 등에 관한 정보가 central control room들의 linac panel과 display에 나타나야 한다.

이러한 기준들은 control system을 설계하는데 다음과 같은 사항을 기본적으로 고려케 한다.

(1) Signal 선택

제일 먼저 어떤 signal들을 계측제어의 대상으로 삼아야 할 것인지를 결정해야 한다. 이를 위해서는 beam의 조절을 위한 기본 control 개념이 나와야 하고, equipment layout이 나와야 한다. 가속기의 특정성과 보호기능을 수행할 수 있는 부속계통이 정의되면, 가속기 운영에 관련된 signal이 선택될 수 있다. 가속기 운영과 관련된 information에 따른 signal이 상당히 많고 또 그들을 얻어내고 전송하는 것에 대한 cost가 상당히 높기 때문에 signal은 가속기

작동을 위하여 필요한 최소한의 것으로 선택되어야 한다. Modulator-Klystron 작동의 경우 on/off인 것과 작동이 주어진 specification 이내에서 이루어지는지 아닌지를 보여주는 3개의 signal이 이 최소의 signal이 될 수 있을 것 같다.

(2) Interlock

모든 acceleratore의 모든 부품 및 장비들은 가능한 다른 부품들의 malfunction이나 failure에 의해 손상을 받지 않도록 되어야 한다. 만약 주변 electromagnetic effect나 지구자기로부터 beam에 대한 영향을 방지하는 de-Gaussing 시스템의 전원이 나가면 빔이 accelerator 중심축에서 벗어나 disk-load wave guide의 벽이나 beam scraper를 때려 손상을 가져올 수 있는데 이때는 machine protections system(MPS)이 작동되어 beam을 멈출 수 있어야 한다. 따라서 MPS는 vacuum system, cooling water system, RF drive system 및 ac voltage system을 항상 감시하고 시스템 부품에 위험이 생길 가능성이 있으면 beam을 끌 수 있어야 한다. 이러한 보호기능은 사람에게도 적용되어 작업자를 고출력전압과 가속기가 내는 X-ray에서 보호할 수 있어야 한다. 즉, 위험이 원인인 RF power나 beam이 없을 때만 접근이 가능하도록 하는 Interlock이 control system에 구현되어야 한다.

(3) Accelerator operation

Linac 운영을 위한 control concept는 beam이 켜있는 동안 주요부품의 유지보수가 가능할 것, 모든 주요 control은 central control room으로 집중될 것, 그리고 local operation은 일시적으로 할 것 등이다. Linac의 경우 klystron이 한두 개 고장나더라도 beam 에너지가 약간 떨어지거나 다른 Klystron의 power를 올림으로써 beam의 운영은 가능하다. 따라서 beam이 켜있는 동안 주요부품의 유지보수가 가능해야 한다. 이러한 이유로 Klystron 같은 장비들은 operation시 접근할 수 없는 고방사능 지역에 설치할 수 없다.

(4) Beam의 사용

Linac은 일차적으로 storage ring에 full energy로 전자를 입사시키는 것이 주목적이나 storage ring의 전자 fill-up time은 현재 10분 이내로 예상되며 storage ring의 life-time(예상 5시간 이상) 중 나머지

지 시간은 idle time이 된다. 이 나머지 시간중 Linac은 중간중간에 위치한 beam analyzing station을 이용하여 여러 가지 다른 목적의 실험을 할 수 있다. 이런 다른 목적으로 Linac이 사용되는 경우 PLS central control room에서는 Linac이 사용되고 있다는 정보가 전달되어야 하지만 Linac beam의 control은 Linac central control에 맡겨질 수 있어야 한다.

#### (5) Local control

위에서 기술한 것과 같은 beam의 storage ring 이외의 사용은 Linac 건설공정과 함께 local control 개념을 정립할 수 있게 한다. Local control은 real time, multi-tasking 기능이 있어야 하고, 확장이 가능해야 한다. 또 하부 control system이 오작동을 하더라도 전체 성능에 큰 영향을 끼치지 말아야 한다. Commissioning이 완료된 후에는 모든 장비의 손쉬운 maintenance를 보조하고 storage ring 이외의 다른 여러 가지 실험을 시행할 수 있게 해야 한다. Linac alignment는 local control에 포함시킬 수 있다. 각 sector 끝에 있는 control들은 central control과의 연결점 역할을 수행해야 한다.

#### (6) Linac central control

Linac central control은 linac 전 sector의 중요 beam의 상태, 제어상태를 보여줄 수 있어야 하며 빔에 문제가 있는 경우 어떤 sector가 문제가 있는지 Linac 운전원에게 보여질 수 있어야 한다. Linac의 central control room은 물리적으로 linac 건물에 위치한다. Linac central control system은 linac 운전 에 관한 모든 책임을 부여받아야 한다. Linac이 storage ring의 입사 시스템으로 쓰이고 있기 때문에 Linac의 사용정보가 storage ring control system의 linac panel에 지시되고 또 필요시 storage ring에서 linac control을 떠맡을 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 역으로 storage ring 운영에 관한 종합적인 정보가 linac control room에도 전달되어야 한다.

## 5. 시스템 추진전략

앞장에서 언급한 시스템 개발환경 및 요건에 따라 Linac control system을 개발하고자 할 때 실질적으로 여러 방법, 경로가 나타난다. 공정, 경비, 기

술능력의 제한에 맞추어 project에 대한 위험과 경비를 줄이고 기술개발을 최대한으로 유도하기 위해 다음과 같은 설계의 지침을 세우고자 한다.

#### (1) 초기의 필요 computer의 기능의 최소화

처음에는 Linac control 시스템의 개발목표는 Linac의 작동기능을 computer 입장에서는 단순한 기능의 보조만으로 수행하게 하고 고급기술을 시험 도입하는 것을 억제하는데 system의 개발 및 Linac에 대한 운영경험이 축적되고 기술능력이 향상됨에 따라 state-of-the-art 기술을 도입한다. 이 철학은 Linac의 sector별 공정계획과도 일치한다. 따라서 첫 sector의 경우 operation 및 commissioning은 가능한 수동으로 수행하고 이것이 확립된 후 computer control로 대체한다. 이러한 방법을 택함으로써 문제발생시 문제점 위치를 쉽게 포착하고 이 문제를 따로 고립시켜 수정할 수 있다. 그러나 최후에 건설될 sector의 control 시스템도 최소의 작동기능이 당면한 목적이라도 완전히 전산화 될 가능성을 염두에 두고 설계한다.

#### (2) 신뢰성

문제발생의 잠재요소를 줄이고 control system의 신뢰성을 높이기 위하여 hardware는 시장에서 쉽게 구할 수 있음이 증명된 제품을 쓰고 software도 가능한 다른 가속기 연구소에서 사용이 증명된 것을 입수하여 사용한다. 개발이 필요한 hardware software는 품질보증 절차에 따라 최종시험 기록을 남긴다. On-line 분석용 전산 software는 design에 사용하였던 것을 모체로 계속하여 전산 software 변형과정에서 예상치 않은 실수가 도입되지 않은 것을 방지한다.

#### (3) 유지보수성

각 control 시스템들은 상호간에 독립성을 어느 정도 갖게하여 한 곳의 오동작이 전체 시스템의 정지 상태가 되지 않도록 한다. 각 장비나 software들은 문제진단과 수정이 용이하도록 한다.

#### (4) 개발성

처음에는 시스템의 자체개발을 자제하고 우선 외부 software의 수용, software와 hardware의 종합화, 수정, 및 hardware의 유지보수 능력을 확보하는데 주력한다. 그러나 최종 시스템의 개발은 충분한 개발능력을 확보하였을 때 완성될 수 있다. 이를

위하여 software 및 hardware 개발환경을 구성한다.

### 6. 시스템 설계

앞에 기술한 개발환경 및 개발기준에 의하여 Linac computer control 시스템에 대한 설계개념이 창출될 수 있다. 이에 의하면 Linac의 computer control system은 fron-end-controller, 3 local control station (positron option의 경우 4), mainlinac central control station의 3계층의 구조를 갖는 분산 computer control 시스템으로 구성하는 것이 시스템의 유연성, 확장성을 위해 바람직하다. 그리고 Linac의 운영상황은 storage ring control room에서 그 상황을 알 수 있게 하고 storage ring의 운영상황도 linac에서 알 수 있게 한다. Linac의 control은 Linac central control computer가 담당하게 한다. 이 경우 Linac의 central computer는 mini computer 급으로 하고 local control은 micro computer 급이면 충분할 것이다. 그림 2에 network 구성도를 보였다. I/O interface는 Bending Magnet 나 Quadrupole Magnet의 경우 16bit 분해능을 갖게 하고 다른 경우는 12bit를 사용한다. A/D conversion 시간은  $50\mu s$ 으로 한다. Front-end-intelligence control board로서는 16bit이나 32bit micro processor를 사용하고 multipriority, vectored interrupt, parallel & serial I/O, DMA interface, MEM가 64K byte 이상인 off-the-shelf-item들을 사용한다. Front End Controller와 local control system간의 data throughput은 약 50Kbit/sec 정도로 정한다. Touch screen 과 digitized encoder가 설치되면 가속기 운영이 좀 더 편리해질 것이다.

Linac control room의 특성을 알기 위해서는 기본적으로 beam의 전하량, 수평, 수직위치, profile 등이 측정되어야 한다. beam pulse를 관측하고 최대전류, 평균전류, 총전하 등을 측정하기 위해 toroidal current transformer를 사용하고 wall current등을 측정한다. Injector의 빔전하를 측정하기 위해서는 Faraday cup을 사용한다. 이 cup은 injector 시험기간 중에도 stopper로도 사용된다. beam의 수평, 수직위치를 측정하는 beam position

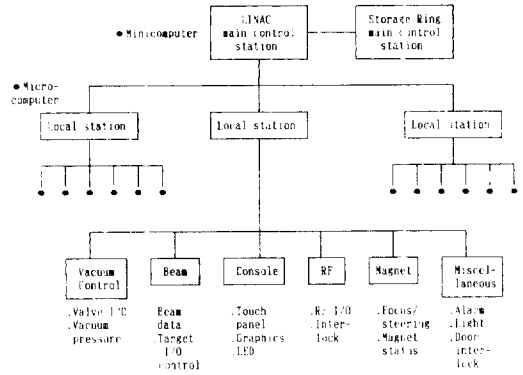


그림 2. Linac control network

표 4. Linac Beam Monitor

Monitor	형 태	수 량
beam 위치	4 strip lines	15
beam profile	screen	12
beam instensity	toroid transformer	7
beam instensity	wall current	7
beam stopper	Faraday cup	1
beam loss	Ion chamber	16

monitor로는 약 30cm 길이의 4strip line을 사용하는 방법과 높은 Q의 resonant cavity를 사용하는 microwave 방식이 있다. Microwave 방식은 sensitivity가 좋은 대신 strip line은 저렴한 가격, 쉬운 제작, 그리고 보다 나은 공간분해능의 잇점을 갖는다. PLS에서는 strip line monitor를 주로 사용할 예정이다.

형광 target monitor는 beam profile, beam emittance, beam position 및 beam spread를 측정하는데 유용하다. Ion chamber는 beam이 가속기 중간에서 잃어버리는 경우 그 위치를 전자빔이 발생시킨 X-ray를 이용하여 찾아내는 장비로 commissioning 기간중 매우 유용할 것이다. 표 4에 구상중인 monitor의 종류의 양을 보였다.

### 7. 맺음말

본 논문에서는 Pohang Light Source의 2 GeV

---

Linac의 computer control system에 대하여 지금까지 개발된 개념에 대하여 개괄적으로 기술해 보았다. 이 control 개념은 아직 개발단계에 있으며 Linac의 다른 부분에 대한 추진방법이 결정됨에 따라 함께 결정될 예정이다. 아직 결정해야 할 사항중 중요한 것은 Klystron과 Modulator를 어떻게 제어하며 beam과 RF wave의 올바른 위상을 유지하게 하느냐 하는 문제인데 Klystron의 공급처, 종류 등

이 결정되지 않은 등의 이유로 좀더 연구해야 할 과제로 남아있다. 또 하나 해결해야 할 중요한 문제는 storage ring과 data sharing인데 현재까지의 구상은 1990년말까지 완성될 처음 100 MeV section의 기능을 만족시키는데 control의 개발능력을 집중시키고 Main control system의 설계는 control외의 다른 부분의 설계경험이 좀더 축적될 때까지 검토의 여지를 남겨두고자 한다.