

# 포항 방사광 가속기 전자빔 진단용 계측제어

원 상 철\* · 장 석 상\*\*

(\*포항공대 전자전기공학과 조교수,

\*\*동 방사광 가속기 연구소 책임연구원)

## 1. 서 론

가속기는 여러 기기의 유기적인 운용에 의해 운전되어, 그 결과로써 가속 beam의 질이 결정된다. beam monitor는 beam 자체의 특성을 관측함으로써 각종기기의 동작, 기기간의 상관의 양부를 판단하는 정보를 얻는 데 있다. electron gun에서 발생한 전자입자들은 입자의 진행방향으로 거의 균일하게 분포되어 있으나, linac에서 rf cavity에 의해 가속을 받으면 가속주파수의 전위상각에 대하여 균일하게 분포되어 있던 입자는 고주파 전압하에서 위상진동이 시작되면서 평형위상각의 주위의 영역에 집중하게 된다. 이것을 bunching이라고 하고 bunch가 형성되면 beam의 신호의 spectrum은 고주파대역까지 확장되고 또 주기적인 신호로 되므로 beam 검출에 있어서 큰 의미를 가지게 된다. linac에서 필요한 energy까지 가속된 beam은 bucket단위로 storage ring에 입사된다. 이와 같이 다수의 전자입자의 집합체로써 beam신호는 입자간의 상호작용 뿐만 아니라 beam을 운전하는 여러 기기 간에 생기는 상호작용을 해석하기 위한 수단이나 정보를 제공한다. 따라서, 가속기의 효율적인 운전 및 가속기 물리학의 연구에 있어서 각종 beam monitor는 가속기동작의 종합적 진단을 하는 데 중요한 역할을 한다. 가속기

건설시 뿐만 아니라 운전시 필요한 monitor는 고주파 공동, 전자석 그밖의 진공 chamber, 각종 전원 등을 포함한 제어장치등의 중요한 기기들을 제어하기 위한 sensor로써 확실한 동작해석에 따라서, 설계제작하지 않으면 안된다. monitor에 의해 검출되는 신호는 직접 scope로써 관측할 수 있는 양이외에는 대부분의 경우 신호처리로를 필요로 하고 monitor의 정도도 검출기의 기계설계 및 회로설계에 의존한다. 따라서, 그 구성요소인 전송 cable, 증폭기, 필터, 그밖에 mixer등의 특성을 정확히 해석할 필요가 있다. 또한, beam monitor는 장시간에 걸쳐 고속, 고정도, 신뢰성을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. PLS의 Storage ring에 설치될 기본적인 beam diagnostic instrument는 다음과 같고 Table 1에 monitor의 수와 기능을 표시한다.

- (1) beam position monitor
- (2) beam intensity monitor
- (3) stripline monitor
- (4) photon beam monitoring system
- (5) beam steering system
- (6) special diagnostic instrument for the commissioning

표 1. 모니터 타입별 수와 기능

Monitor Type	Quantity	Funcion
4-Button type pick-up electrode	96	Beamp Position
D. C. Current Transformer	1	Averaged Beam Current
C. T.	1	Fast Beam Current
Stripline Electrode Horizontal	2	Beam Damping Betatron Tune
Vertical	2	
Photon Monitoring System	1	Beam Profile, Beam Bunch Shape, Betatron Tune
Screen Monitor	4	Beam Transport, Beam Injection
Scraper	2	Beam Transport, Beam Injection
Beam Loss Monitor	20	Beam Loss
VUV/X-ray Monitor	each beam line (optional)	Beam Position (beam line)

## 2. Beam Position Monitor (BPM)

BPM은 storage ring내를 돌고 있는 전자 beam의 위치를 검출하는 monitor이다. PLS에서 BPM은 총 96군데 설치되어 storage ring내의 beam의 closed orbit를 측정한다.

Storage Ring 내를 돌고 있는 전자 beam의 위치는 정전 유도형전극을 진공 chamber에 직접 설치하여 전자 beam에 의해 유기되는 진공 chamber내의 image charge를 검출함으로써 얻어진다. 전자 beam과 같이 bunch폭이 짧은 경우에는 time constant를 필요이상 크게하면 측정계의 dynamic range를 나쁘게 한다. 따라서, 전극자체를 작게하여 정전용량을 낮추는 방법을 취하고, 또한 가속기의 acceptance를 효율적으로 넓히기 위해 전극을 진공 chamber 내벽과 같은 위치에 설치해 수평 수직방향의 beam의 위치 검출을 한 곳에서 얻을 수 있게 한 것이 button형 전극이다/1-4/. 4개의 검출용 전극은

image charge를 검출하기 위해 그림 1과 같이 진공 chamber 벽에 대칭적으로 설치된다. 수직 수평위치는 각각 상대적인 전압차  $\{(Va+Vc)-(Vb+Vd)\}/(Va+Vb+Vc+Vd)$ ,  $\{(Va+Vb)-(Vc+Vd)\}/(Va+Vb+$

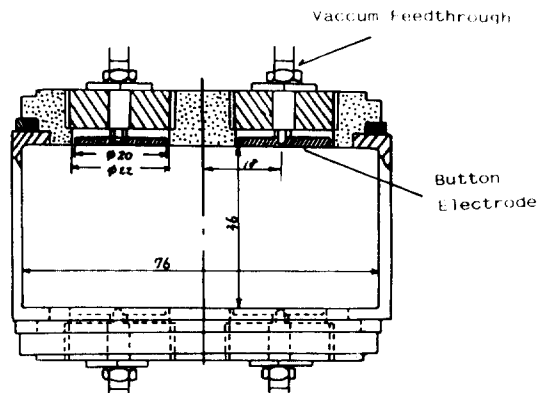


그림 1. Schematic Diagram of Beam Position Monitor

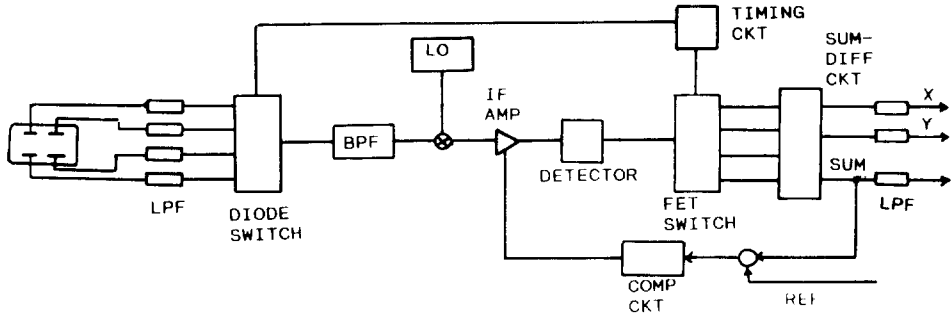


그림 2. Schematics of the BPM Processing Electronics

$V_c + V_d$ )로서 얻어진다. PLS에서 BPM의 측정 정도는 검출 전극과 BPM chamber의 기계설계와 신호처리용 회로설계의 정도에 의존하나 10 $\mu$ m를 목표로하고 있다.

신호처리용 회로는 commercial narrow bandwidth의 rf 증폭기와 검출계를 이용한다(그림 2). 검출 전극에서 얻어진 bunch신호열은 고속 rf PIN diode switch에 의해 각전극의 bunch신호를 선택한다. rf switch front-end의 저역통과 필터는 bunch 신호의 고출력 고조파 성분에 의한 switch의 파손을 방지할 목적으로 설치한다. switch에 의한 선택된 신호는 500MHz의 bandpass filter와 mixer를 통해 중간주파수 10MHz로 heterodyne된다. track & hold 회로로 구성된 detector는 신호의 peak치를 검출하고 microprocessor에 의해 digitize되어 control room에 보내진다. 한편 gain error와 offset의 주기적인 보정은 microprocessor에 의해 행해진다.

### 3. Beam Intensity Monitor

beam intensity monitor는 beam전류, 전자입자수, 전하를 측정 하는 것으로 이것들은 beam의 시간적인 분포를 알게되면 서로 환산가능한 양으로 주로 beam 전류를 측정함으로써 얻어진다. beam 전류를 측정하기 위해 storage ring에는 개개의 bunch의 beam 전류를 측정하는 fast current transformer (CT)와 평균전류를 측정하는 d.c. current transformer (DCCT)가 설치된다.

beam 전류용 transformer는 beam bunch의 고출력성분에 의한 transformer의 파손방지와 고주파에

의한 beam impedance를 줄이기 위해 metal coating을 한 ceramic chamber상에 설치한다.

### 3.1 DCCT

transformer는 원리적으로 beam의 직류성분을 검출하는 것이 불가능하지만, DCCT는 외부에서 이 직류분을 변조시켜 교류적으로 검출하는 형의 전류 transformer이다[5]. 그림 3에서와 같이 beam전류 transformer는 높은 투자율의 Ni-Fe합금으로 된 toroidal core와 stripwound와 자장증폭기를 이용한 고속회로로 구성되어 있으며, toroidal core 속으로 beam이 지나가면 그 크기를 측정할 수 있게 되어 있다. A는 주전류 센서이며 DC Amp.를 통하여 feedback loop를 형성하여 1차측 beam전류와 flux B의 feedback turn수 만큼 곱해진 2차측 귀환전류 사이에 완전한 평형을 유지하게 하며  $L/R_L$  적분기를 통해 가해진 귀환전류로써 beam에 의해 유기된 core flux를 제거한다. turn C에서는 동일한 여자전

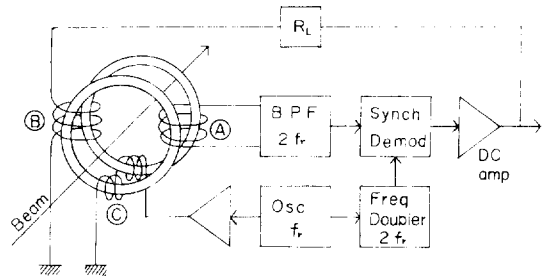


그림 3. Schematics of the Beam Current Transformer

류를 흘리지만 반대방향으로 감겨있으므로 turn C를 통하여 core는 변조주파수와 같은 주파수의 포화된 flux 신호가 생긴다. 이때 beam이 지나가면 그 beam current의 크기에 비례하는 DC flux에 의해 flux 신호가 bias 되며, sensing winding A에 의해 beam 전류의 DC 성분에 비례한 2차 고주파신호를 bandpass 필터와 복조기를 통해 검출한다. 복조기는 turn A의 주전류 센서로부터 2차 고주파 신호의 위상과 진폭을 동기 검파하는 역할을 한다. 따라서, beam전류에 비례하는 출력전압은 저항  $R_L$ 을 통해 흐르는 귀환전류로부터 검출된다. active current transformer system ( $L/R_L$  적분기)과 자장검출용 변조, 복조기회로의 결합은 측정정도를 높이기 위해 사용한다.  $L/R_L$  적분기는 선형영역을 벗어난 transient change로부터 자장변조기를 보호하며 히스테리시스를 방지하며 변조 noise (turn C에서 magnetic parameter의 mismatching 때문에 생긴다)를 줄이는데 이용된다.

이 전류 transformer는 core를 포화시키는 것이 그 원리이므로 비교적 큰 여자전력이 필요하게 된다. 따라서 여자용 전력증폭기의 설계 및 실제의 core의 hysteresis에 의해 발생하는 여자전력의 손실, core의 온도상승과 core의 주파수 특성을 고려하면 여자주파수는 수백Hz이내 이어야 한다. 이것은 monitor로써의 주파수특성이 DC에서 여자주파수의 1/2로 되는 것을 표시한다. 따라서 장시간에 걸쳐 beam전류가 고정도로 관측되지만 전류의 시간적 변화에 대한 응답이 상대적으로 늦어진다. 또한 출력신호는 상대적으로 크기본파와 기수차 고주파성분이 혼합되어 제2고주파검출시 S/N를 저하시킨다. 이것을 방지하기 위해 core 2개를 사용해 같은 성분을 제거하고, 여자신호를 2배로 하여 출력신호를 동기검파 함으로써 S/N을 높인다. 또한 검파 출력을 부귀환을 가해 측정정도를 높인다.

### 3.2 fast current transformer (CT)

CT는 injection 단계나, single bunch 운전시 bunch의 전류를 측정하거나, multi-bunch 운전시에는 fill monitor로써 사용한다. 신호처리용 회로는

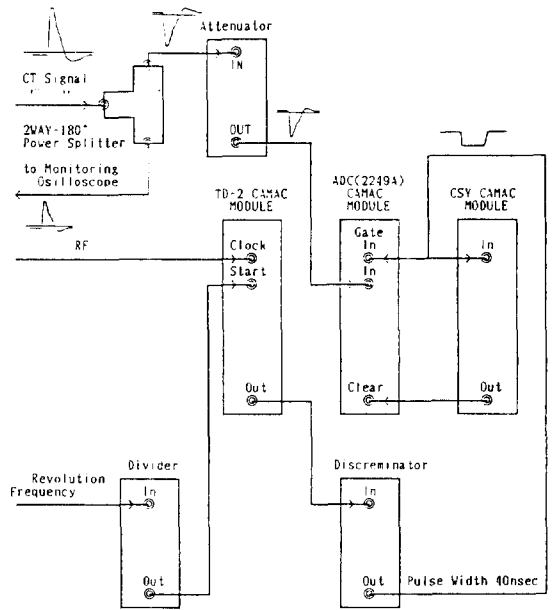


그림 4. Schematics of the CT processing Electronics

그림 4와 같다. ADC의 gatepulse는 임의의 bucket에 들어있는 beam의 전류를 측정하기 위해 먼저 rf 주파수 (500MHz)를 harmonic number로 나눈 주회 주파수를 bucket단위로 delay시킨 출력 pulse를 얻는다. 이 pulse를 discriminator에 입력해서 적당한 pulse폭을 가진 gate pulse를 얻는다. ADC는 gate pulse내에 포함되어 있는 CT신호를 적분해서 digital data에 변환한다.

## 4. Stripline Monitor

beam이 종, 횡 방향에 진동이 일어나면 가속기내의 임의의 위치에서 관측되는 beam신호의 spectrum은 진동주파수의 고주파성분이 동반된다. 이것은 가속기 구성요소(진공 chamber 내벽의 불연속성, 고주파 가속공동등)간의 전자기학적인 영향으로 이 고주파성분의 1개가 고주파 가속공동등의 공진주파수와 일치하게 되면 그 성분은 크게 증폭되어 역으로 beam이 힘을 받게 된다. synchrotron내의 beam은 이와 같은 힘을 주회할 때마다 간헐적으로 받게 되어 진동진폭이 증가하거나 tune이 변화해서 beam의

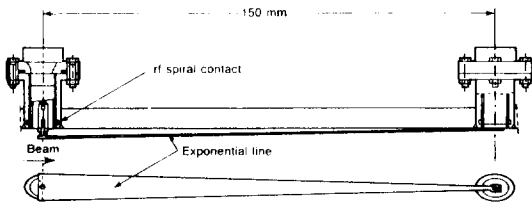


그림 5. Broad band tapered stripline monitor

광학적 공진점에 접근하게 되어 결과적으로는 beam 이 불안정하게 된다. 따라서 가속기운전시 tune은 항상 감시해야 하고, 불안정한 진동진폭을 감쇄시켜야 한다.

betatron tune, beam damping rate, beam transfer function등의 기본적인 beam의 특성을 조사하는데 2조의 중, 횡 방향 검출 및 여자용 전극을 적당한 간격으로 진공 chamber벽에 설치한다. 이 전극은 광대역의 주파수 특성을 얻기위해 button형 전극 대신에 stripline전극을 사용한다. stripline monitor는 button형 monitor보다 넓은 범위의 주파수 특성을 가지고 있어 bunch과형의 관측에도 사용된다. 이 monitor는 진공 chamber본체와 그내부에

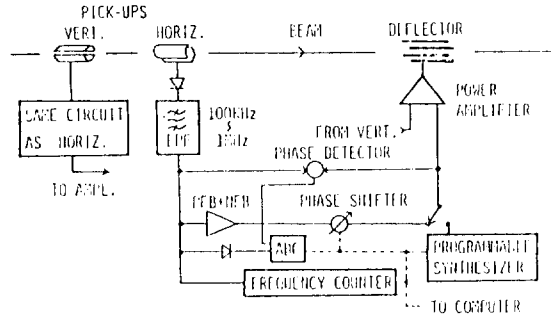


그림 7. Schematics of the Betatron Tune Measurement

설치한 전극속을 beam의 전자장이 전파되어 나가는 유사 동축전송계로써 해석가능하며, striplin의 특성 impedance는 관측신호를 전송하는 cable과 impedance 정합을 위해 50ohm 또는 70ohm d.p 설계된다. 이것은 stripline전극의 폭 W와 chamber 중심에서의 거리 b를 변화시킴으로써 얻어진다/6/. 또한 평탄한 주파수 특성을 얻기 위해 전극의 w, b는 지수적으로 변화하는 taper진 형상으로 설계된다(그림5)

beam damping은 검출 전극에서의 검출된 진동신호

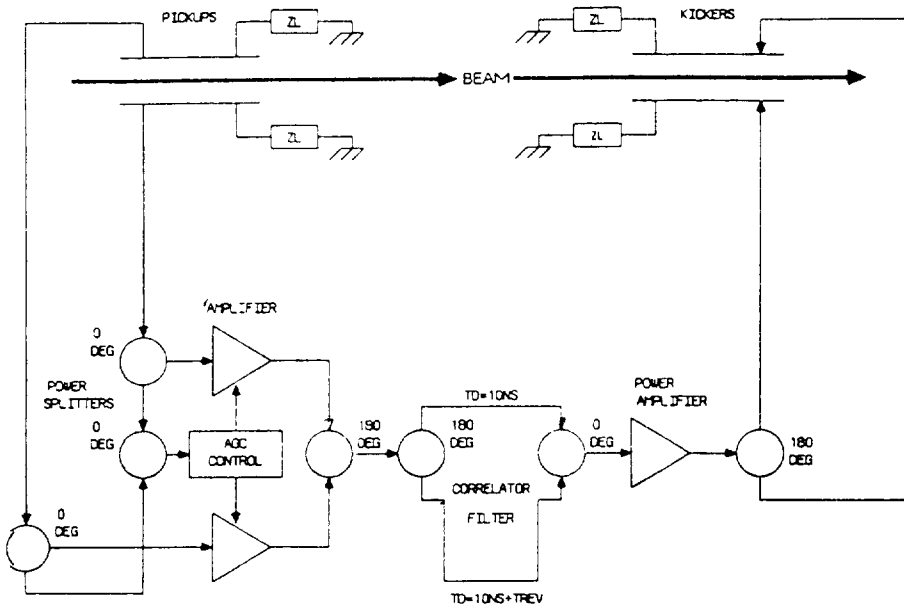


그림 6. Block Diagram of the Transverse Feedback system

를 증폭, 위상조정을 행한 뒤 여자전극에 의해 beam 자신에 negative feedback시킴으로써 얻어진다(그림6)/2/. betatron tune은 여자용전극에 rf신호에 의해 beam에 coherent oscillation을 여자시킴으로써 검출 전극에서 얻어지는 turn과 beam의 주회주파수의 적으로 나타나는 공진주파수를 검출함으로써 얻어진다. 이 때 검출용 전극에서 얻어지는 beam신호는 spectrum analyzer와 network analyzer에 의해 해석된다(그림7).

### 5. Photon Beam Monitoring System

전자가 bending magnet를 통과할 때 자장에 직교하는 방향에 가속도를 받아 synchrotron radiation (SR)이 일어난다. storage ring에서 방사되는 SR에는 ring을 돌고 있는 전자 beam에 관한 정보가 포함되어 있다. 단, SR 그 자체의 성질과 전자 beam

에 관한 정보가 중첩되어 관측되기 때문에 이들과 정보가운데서 전자 beam에 관한 정보만을 추출할 필요가 있다. PLS에는 beam진단 전용의 beam line을 설치할 예정이다.

#### 5.1 가시광영역에서의 beam monitor/7,8/

가시광 영역을 이용하는 것은 광학적으로 매우 간단히 구성할 수 있으므로 beam에 관한 여러정보를 얻기 위해 널리 사용되고 있다. storage ring에서의 가시광의 추출은 높은 강도의 VUV, X선 flux에 의해 vacuum window에 전달되는 열의 문제를 해결하기 위하여 동판에 Ag coating한 수냉 mirror를 넣어 반사시킨후 Be window를 통해 얻어진다(그림8).

##### 1) beam spot measurement

beam spot는 다수의 lens로 구성된 망원경의 결상을 직접 TV camera의 광전면에 입사시켜 얻어진다. 광량은 half mirror, ND filter로써 조정한다.

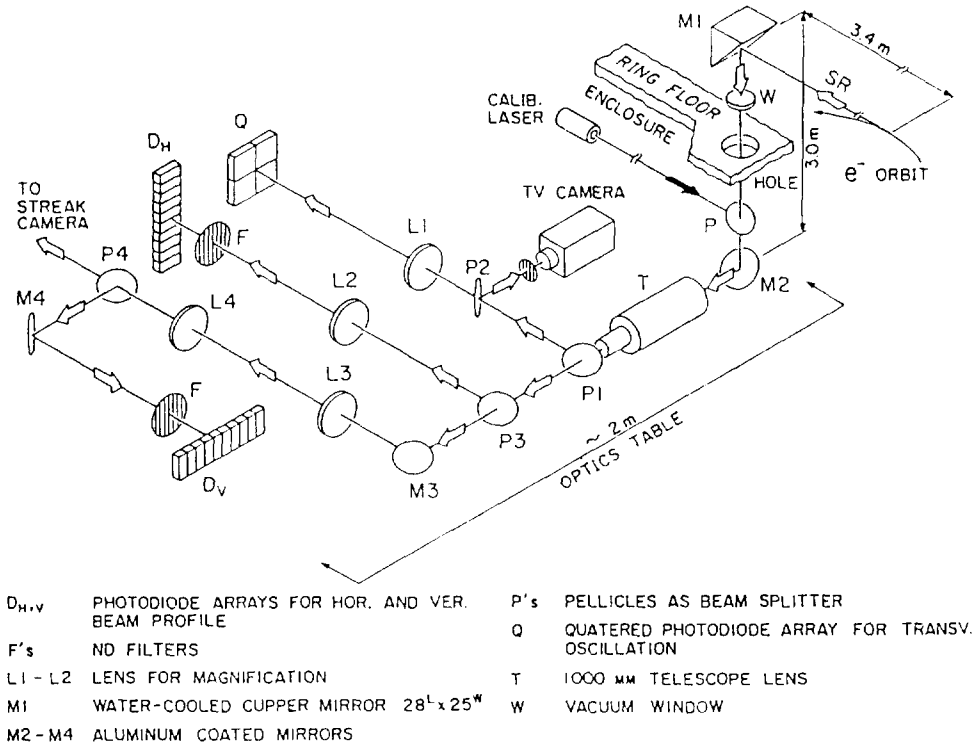


그림 8. Schematics Diagram of Integrated Optical Moinitoring System

2) beam profile monitor

beam의 수평수직방향의 size는 35 소자를 가진 photodiode array를 이용해 측정한다. beam size의 보정은 발광점과 같은 거리에 위치한 Laser beam을

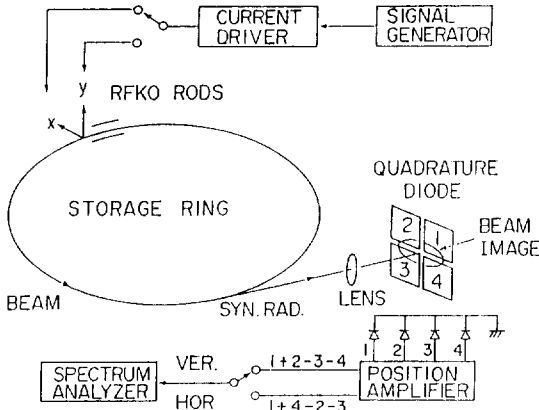


그림 9. Betatron Tune Measurement System Using Synchrotron Radiation

이용해 beam의 이동량으로 photodiode array에서의 1소자당 이동량을 환산해 광학계 배율을 곱해 보정한다.

3) betatron tune measurement

beam의 횡방향의 진동측정에는 quadrature photodiode를 이용해 상하, 좌우의 신호차로 tune을 측정한다. 측정방법은 beam을 rf knock out 방식으로 강제진동시켜 주회주파수로 ring을 돌고 있는 beam의 1주당 betatron진동수의 소수부로서 공진하는 주파수 (betatron 진동수의 소수부와 주회주파수의 적)를 photodiode로 검출한다. 그림 9.에 그 system을 표시한다. diode에서의 신호는 spectrum analyzer에서 공진주파수를 신호의 peak치로써 관측한다.

4) bunch shape measurement

bunch shape는 streak camera에 의해 측정한다. 그림 10.에 camera와 trigger계의 구성을 표시한다. trigger신호는 RF 500 MHz를 harmonic number로

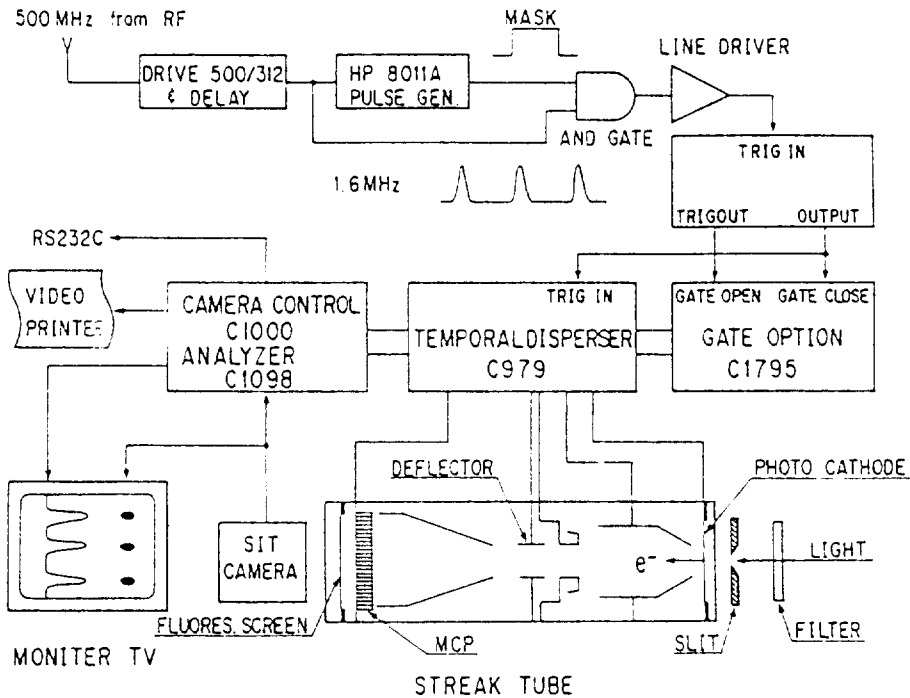


그림 10. Streak Camera System Composed of the Trigger/Gate Circuits and the controller and analyzer

나는 값을 2ns마다 delay 가능한 MASK pulse와의 AND를 취해 gate open 신호로 한다. trigger신호는 open에서 20ns정도 이후에 발생되도록 하고, gate close신호는 open에서 300ns에 발생되도록 한다. streak image는 SIT camera에 투영되고, 광의 spot의 density 분포를 temporal analyzer로써 histogram한 것을 CRT상에 표시한다.

### 5.2 VUV영역에서의 beam monitor

beam line에서의 초진공 중에서 beam전류를 측정하기 위해서는 VUV영역에서 광대역의 dynamic range와 미소전류 측정이 가능하기 때문에 photoemission를 이용한 검출방법이 이용된다. 또한 VUV는 X선에 비해 광의 확산각이 크기 때문에 수직방향의 beam의 위치를 측정하기 위해서는 상하의 photocurrent의 차로써 위치를 측정하는 방법이 이용되고 있다.

#### 1) beam current monitor

초진공 중에 설치된 수냉 copper의 chathode에 직접 SR을 주사해 이때 발생하는 photoemission을 전류로써 측정한다(그림 11).

#### 2) wire monitor

SR의 VUV 영역을 이용해 beam의 위치를 검출하기 위해 2개의 tungsten wire를 수평 또는 수직으로 설치하여 beam의 분포와 상하 또는 좌우를 접촉시켜 이때 발생하는 photomission의 차에 의해 beam

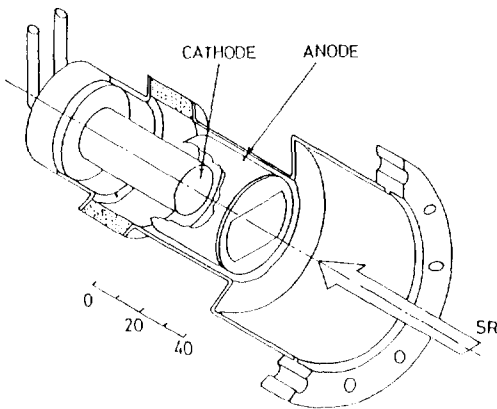


그림 11. photo-cathode Type Beam Current Monitor

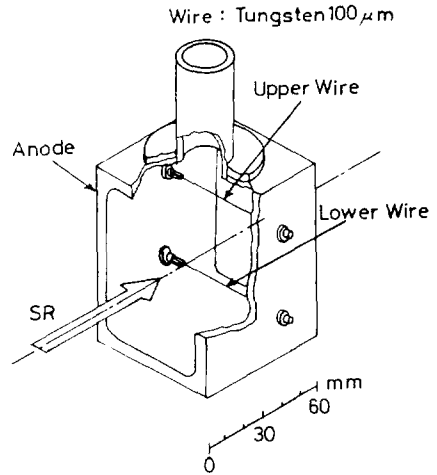


그림 12. Wire Monitor for VUV

의 위치를 구한다(그림 12).

### 5.3 X선 영역에서의 beam monitor

X선 영역에서도 가시광 또는 VUV 영역에서 얻어지는 정보를 얻을 수가 있다. VUV 영역에서는 초고진공의 조건에서 검출이 가능하지만, X선의 경우에는 Be window 이후에 He gas 또는 통상의 진공 중에서도 측정이 가능하다. beam의 검출방법은 gas 중에 X선을 통과시켜 ion화 된 전류를 측정하는 방법으로 beam의 flux, 위치, profile을 구할 수가 있다. 또는 형광판을 설치해 beam의 분포 위치를 측정할 수 있다.

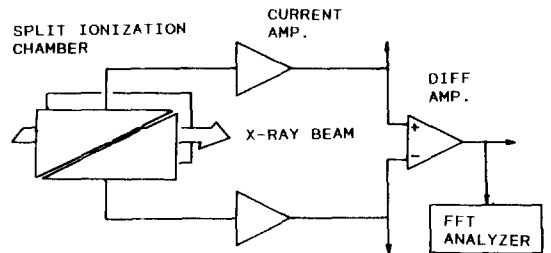


그림 13. Split Ion Chamber Monitor. The difference between upper and lower ionization currents is proportional to beam displacement from the chamber center.



1) fluorescent screen

X선을 형광관에 비춰 beam spot를 TV camera로써 관측하는 방법으로 digital image processing에 의해 정량적으로 beam의 위치, 확산도 등의 정보가 얻어진다.

2) split ionization chamber

X선 ion chamber의 전극을 대각선상으로 2분할해 X선이 chamber를 통과할 때 발생하는 ion 전류를 분할전극간의 차를 취해 beam의 위치를 검출한다 (그림 13).

### 6. Beam Steering System/9/

안정된 synchrotron light source를 얻기 위해서 고정도의 position stability가 요구된다. beam의 위치 noise는 lattice 구조의 기계적, 열적변형에 기인할 뿐만 아니라 전자석의 power supply current의 변화, cooling pump, compressor등의 운전시 진동에 의한 영향 및 대기의 온도변화에 대한 가속기 진동 자체의 변형에 의한 영향등에 의해 일어난다. 그러므로 beam케도를 안정하게 하기 위해서는 computer 제어에 의한 feedback control이 필요하다. 이러한 beam steering system은 다음과 같이 2개의 형태로 나누어진다.

1) closed orbit distortion (COD) correction system

COD correction은 가속기 전 케도에 걸쳐서 beam의 위치를 안정시키기 위해서 행해진다. closed orbit는 가속기 원주상에 설치된 전 BPM과 beam line상에 설치된 photon beam monitor를 동원해 얻어지고, 기준(설계상의) 케도로부터의 drift는 보정용 전자석의 전류의 세기를 조정하여 보정시킨다. COD corrections system을 그림 14에 표시한다.

2) local steering bump feedback system

beam line에서의 beam position stability는 user에게 안정된 beam을 공급하기 위해 필요하다. photon beam의 position stability는 근본적으로 저장 ring의 편향전자석 부근에서의 전자케도의 안정성에 의존한다. source point에서의 수직변위와 구배가 각각  $y, y'$ 라면, source point에서 거리  $a$ 에 위치한 실험동에서의 변위는  $Y = y + y'a$ 로 주어진다. 따라서 beam line에 안정된 beam을 공급하기 위하여 storage ring상의 beam line용 port주위에 bump용 steering 전자석을 설치해 feedback control을 할 필요가 있다. 각각의 beam line에는 여러 종류의 photon beam position monitor(VUV, X)가 설치되

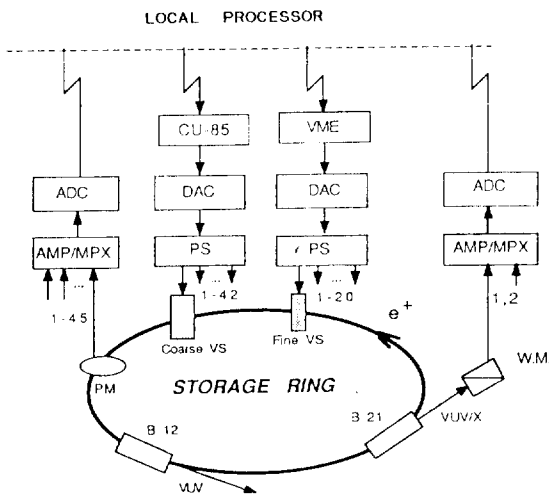


그림 14. Closed Orbit Distortion Correction System

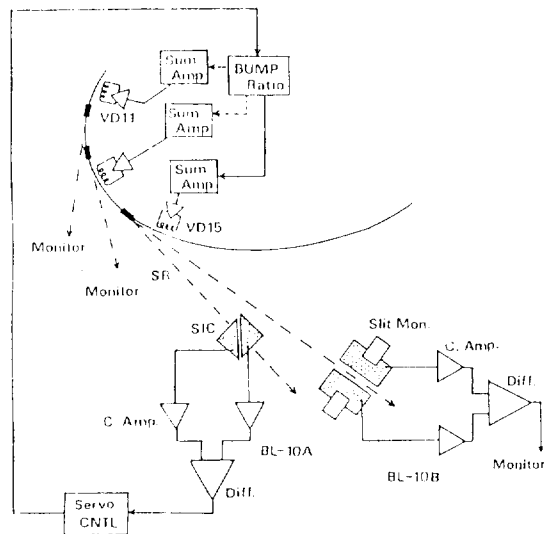


그림 15. Local Steering Bump Feedback System

고, 이 monitor의 position accuracy는 수  $\mu\text{m}$  order이다. 이 monitor에서 얻어진 data는 적당한 신호처리를 행한 후 local bump용 servo system으로 보내지고 저장링의 beam line port에 설치된 3개의 steering 전자석을 구동하게 된다(그림 15).

## 7. Special Diagnostic Instrument for the Commissioning

commissioning단계에서 beam transport line에서 storage ring에 효과적으로 beam을 입사하거나, 시운전시 diagnostic instrument와 control algorithm을 수정 또는 보정하기 위하여 여러 beam parameter를 측정할 필요가 있다. 이 단계에서의 position과 profile은 형광 screen등과 같은 접촉성 monitor로 측정된다. 조작성이 좋고, 신뢰성이 높은 접촉성 monitor는 scintillator 또는 flag이다. flag는 trouble-shooting 뿐만 아니라 commissioning 단계에서 beam 측정에 중요한 역할을 한다. scintillation film은 전자 beam의 접촉에 의해 발광되는 것을 이용하고, 이것을 CCD camera에 의해 monitor한다. 또한 beam loss monitor는 storage ring주위의 국지적인 beam loss를 측정하기 위해 설치한다.

## 8. 결 언

beam monitor는 beam이 발생하는 전장, 자장 또는 방사광등 beam에 의해 유기되는 ion을 관측하는 것과 같이 간접적으로 beam의 정보를 얻는 방법과 beam의 진로에 직접 sensor를 삽입해 전하입자로서의 beam과 장치를 구성하는 매질의 상호작용에 의

해 정보를 얻는 방법으로 대별할 수 있다.

monitor는 전극등의 검출기에 유기되는 신호 level이 비교적 낮으므로 설계 제작시에는 대개의 경우 이론적인 계산을 그대로 설계에 적용할 수 있다. 따라서, 설계 제작시에는 동작원리등을 충분히 검토한 후에 설계해야 한다. monitor의 정도는 검출기의 기계설계와 회로설계의 적부에 의해 결정되기 때문이다.

한편 전자 beam에 의해 유기되는 전기적성질을 이용한 beam monitor에 비해 SR을 이용한 monitor의 경우에는 주위의 전기적인 noise의 영향을 전혀 받지 않는다는 점에 커다란 이점을 갖고 있다. PLS에서 목표로 하고 있는 제3세대 machine에서도 SR monitor는 중시되고 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) T. Katsura and S. Shibata, KEK-79-27 A/P
- 2) LBL PUB-5172, ALS CDR, Sctn 3, 9, 1989
- 3) J. Bittner, NSLS Design Handbook, Ch. 6, 1978
- 4) K. Nam, J. Choi and S. J. Hahn, PLS TR-BD 88-06, 1989
- 5) K. Unser, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 2344(1981)
- 6) T. P. R. Linnecar, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 3409(1979)
- 7) A. P. Saversky, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 2162(1979)
- 8) R. J. Nawrocky, J. Galayda, L. H. Yu and D. M. Shu, BNL 36497, 1985
- 9) J. Galayda, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32, 2132(1985)