

포항 방사광 가속기의 고주파시스템 설계

김 영 수

(포항공대 전자전기공학과 부교수)

1. 서 론

포항 방사광가속기(PLS : Pohang Synchrotron Light Source)는 크게 선형가속기 부분과 저장링(Storage Ring)이라 불리는 원형부분으로 구성되어 있다.

고주파 시스템의 역할은, 선형 가속기 부분에서는 전자빔을 가속시키는 것이고 저장링에서는 전자빔이 방사광 복사 때문에 잃는 에너지를 보충해 주는 것이다. 이 논문에서는 PLS 저장링에서의 고주파 시스템 설계를 다루었다.

저장링에서 에너지 공급이 실제로 일어나는 곳은 Cavity (가속공동)이고, Cavity에 고주파의 전장을 걸어주어 전자군 (electron bunch)이 통과할 때 가속되는 형식으로 에너지 전달이 일어나는 것이다.

이러한 고주파 시스템 설계에 있어 중요한 것은 고주파의 주파수 선택 및 Cavity 형식의 선정이다. 이 논문에서는 이들을 우선 다루고, 다음에는 실제로 필요한 최대 가속전압을 계산하고, 다음에 필요한 총 고주파전력(power)을 계산하였으며, PLS에서 채택할 수 있는 고주파시스템의 여러 가지 가능성을 타진해 보았다.

2. 주파수의 선택

저장링 고주파 시스템의 주파수 선택에는 여러 가

지 요소가 고려되어야 한다. 먼저 수백 KW의 전력을 계속 공급해 줄 수 있는 CW RF 전원이 있어야 하고, 둘째로 방사광 가속기 사용자들로부터의 전자군(bunch)의 길이에 대한 요구사항이 고려되어야 하고, 셋째로 방사광의 안전성(stability) 및 저장된 전자들의 수명 (beam lifetime)이 고려되어야 한다.

이러한 요구사항들은 상호 배타적인 경우가 많으므로 적절한 타협이 필요하게 된다. 예를 들면, 높은 주파수를 쓸 경우 파장이 짧으므로 같은 저장링 격자설계하에서는, 짧은 전자군의 길이를 가질 수 있어 결과적으로 짧은 방사광을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 일반적으로 전자군의 길이가 길수록(주파수가 낮을수록) 방사광이 더 안정성이 높아지는 경향이 있다. 또한 높은 주파수에서는 가속공동(Cavity) 및 도파관 부품들의 크기가 작아 편리하지만, 주파수가 높을수록 더 높은 전압을 걸어주어야 적절한 전자수명을 유지할 수 있다는 단점이 있다.

이러한 것들을 고려하여 현재 일본의 Photon Factory, 영국의 SRS, 독일의 BESSY, DESY 및 최근에 건설되고 있는 미국의 ALS 에서는 500 MHz를 가속주파수로 선택하였고, 미국의 APS 및 유럽의 CERN에서는 350 MHz를 가속 주파수로 선택하였다.

현재 PLS의 건설 계획에 있어 가속기 사용자들로부터의 bunch length에 대한 요구사항이 아직 들어오지 않고 있는 상태이므로, 이것이 주파수 선택에

표 1. Commercial Klystrons of 350 and 500 MHz

Company	Type	Frequ-ency (MHz)	R F Power	eff. (%)	Beam (KV x A)	Output Waveguide	Institution
Thomson CSF	F 2055	500	300KW	43	46×15.2	Coax	under development DESY, Cornell DESY Daresbury under development LBL (600 LBS, 103") PF(2 ea) 2.5m
	TH 2105	(508)	1MW	65	85×18	WR1500	
Valvo	YK 1300	500	600KW	60	60×		
	YK 1301	500	800KW	65	75×		
	YK 1305	500	350KW	60	48×		
	YK 1302	(508)	800KW	65	75×		
	YK 1303	(508)	1.1MW	>65	85×		
Varian	VK 8259B	500	300KW	45	44×15	WR1800	
Toshiba	E 3774	500	180KW	62.5	40×8	WR1500	
	E 3786	508.6	1.2MW		90×20		
Thomson CSF	TH 2089	352	1.1MW	68	87.5×18.5	WR2300	under development ANL 4.8m×1.85×1m CERN(LEP), ANL CERN(LEP)
Valvo	YK 1350	354	1.1MW	68	85×		
	V 103SK	354	1MW	68	85×		

사용될 결정적인 조건은 되지 않고 있다. 표 1에서 여러개의 상용 Klystron들의 특성을 보여주고 있는데, 여기서 보면 수백 KW급의 Klystron은 500 MHz 대역에서만 만들어 지고 있음을 알 수 있다. 물론 표 1에 수록되어 있지 않은 수십 KW급의 UHF TV 방송용 Klystron들이 있으나 이들을 PLS에 사용할 수 있을지는 더 검토되어야 할 것이다.

현 상태에서는 500 MHz를 PLS에 가속주파수로 결정하였고, 이로인해 얻을 수 있는 짧은 bunch에 의한 빔의 안정성 문제도 검토 되었으나 심각한 문제는 없을 것으로 판단된다.

3. 가속공동(Cavity)의 설계

가속장치에 일반적으로 사용되고 있는 공동의 형식에는 한개의 공동으로 된 종류와 여러개의 공동으로 구성된 종류가 있는데, 각각 임피던스와 Q등의 특성이 달라 후자는 주로 대형가속기에 사용되고 있다. 참고로 현재의 격자설계에 의하면 고주파 공동이 차지할 수 있는 길이는 대략 6.8미터로서 여기에는 여러개 (4개 이상)의 단일공동을 충분히 설치할 수 있다.

가속공동의 설계에 있어 가장 중요한 것은

fundamental mode의 Q가 높아야 하며 ($10^4 \sim 10^5$), 또한 higher-order mode 들의 Q가 낮아야 beam instability를 억제할 수 있다는 것이다. 또한 ($Z = V_c^2 / P_c$)로 정의되는 임피던스가 높아야한다는 것이다. 여기서 $V_c = \int_{-l/2}^{l/2} E_z dl$, $P_c = \text{Cavity 소모전력}$ 이다.

지난 수십년에 걸쳐 가속공동의 특성이 실험적으로 개선되어 왔으며, 최근에는 3차원 computer code들이 사용되고 있으나 higher-order mode들의

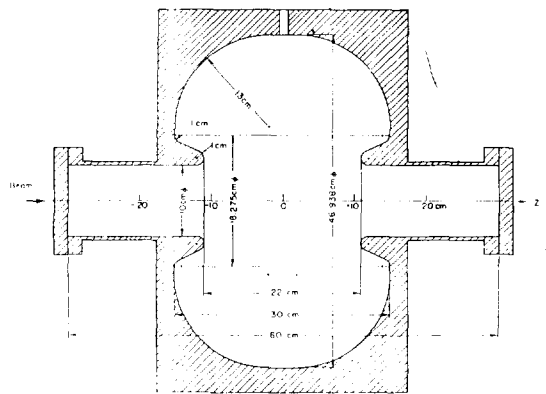
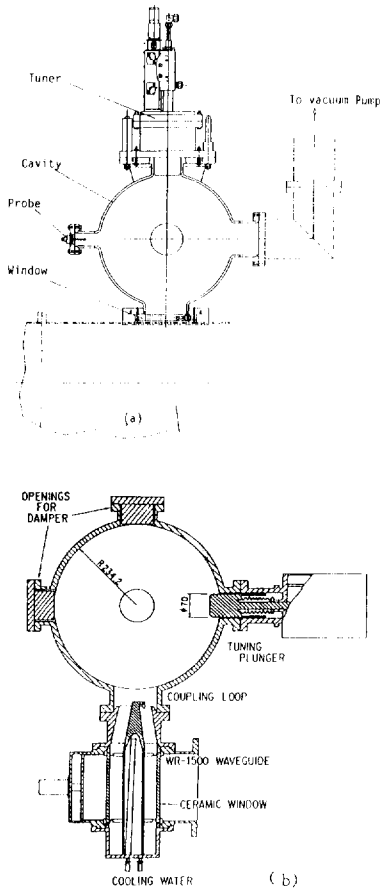


그림 1. Cavity cross section, longitudinal direction



(a) SRS, (b) Photon Factory

그림 2. The Cavity Designs of Single Cell Type

특성은 아직 잘 예측되지 못하고 있다. 이러한 이유로써 현재 미국에서 설계중인 ALS 및 APS에서는 higher-order mode들의 특성이 잘 측정, 발표되어진 일본 Photon Factory의 기본 설계에 따른 단일 공동형식을 채택하였고, PLS도 현재 이를 따를 계획에 있다.

영국의 SRS에서도 비슷한 형태를 사용하고 있으며, 그림 1에서는 전자 진행방향의 단면적을 보여주고 있다. 그림 2에서는 그 직각방향의 단면적을 보여주고 있는데, 두 종류가 약간 다름을 알 수 있다. SRS의 설계에서는 도파관에서 세라믹 window (Cavity의 진공유지용)를 통해 RF 전력이 직접 공

급되므로 구조가 단순한 장점이 있으나, 이 window가 전자 beam에 너무 가깝기 때문에 과열되어 파괴될 위험이 높다. 반면에 일본 PF 설계에서는 도파관에서 세라믹 window를 통해 coupling loop로 RF 전력이 전달되고 또한 이로부터 Cavity 내부에 가속전계가 형성되는 복잡한 형태를 취하고 있다.

또한 SRS 형식에서는 higher-order mode가 window를 통해 빠져나올 수 있으므로 도파관 부분에 적절한 여파기를 설치하도록 되어 있으나 PF 형식에서는 Cavity 자체에 higher-order mode damper를 설치하도록 설계되어 있다. 각각의 장단점에 대한 충분한 검토가 이루어진 후에야 PLS에서 사용할 최종설계가 이루어질 예정이다.

Cavity 한개당 최대 750KV의 전압이 걸리고, 개당의 임피던스는 8MΩ정도이므로 최대 70KW까지의 전력이 Cavity 자체에 의해 소모된다. 이를 냉각시키는 문제, 또한 초고진공(10^{-9} Torr)을 유지하는 문제 및 OFHC(Oxygen-Free High-Conductivity) copper의 가공기술 (초고압이 공동내부에 형성되므로 내부의 표면처리가 1μm이내 이어야 한다.) 등등의 많은 문제점이 국내제작을 의문시하게 하고 있다.

4. 최대 가속전압

전자빔이 거의 빛에 가까운 속도로 회전하면서 방사광 복사 때문에 잃는 에너지 이외에도, 진공 chamber에 유기되는 wake field에 의한 에너지 손실도 가속공동에서 보충해 주어야 하며 또한 충분한 빔의 수명을 위해서는 잃는 에너지보다 몇배나 큰 에너지를 공급해 주어야 한다.

필요한 최대 가속전압, V_{rit} 는 보통 추가전압율 (overvoltage factor) q 로 표시되는데,

$$q = eV_{rit}/U_0 \text{로 정의된다.}$$

여기서 U_0 는 빔의 에너지 손실을 표시한다. 이 추가전압율은 저장링이 받아들일 수 있는 종축방향 운동량의 범위를 결정한다.

$$\left(\frac{E_{\max}}{E_0}\right)^2 = \frac{2U_0(\sqrt{q^2-1}-\cos^{-1}(1/q))}{\pi ahE_0}$$

표 2 . RF Voltage Requirements (Case I, see below)

(R=5.7296m, $\alpha=0.00176$, h=438, $\epsilon_{max}/E_0=2\%$)

Energy No. of ID's installed	2.0GeV			2.25GeV			2.5GeV		
	9	4	2	9	4	2	9	4	2
Magnetic field (T)	1,164			1,309			1,454		
Critical energy(keV)	3,1			4,4			6,0		
$4\epsilon_c$ (keV)	12,4			17,6			24,2		
Bend Magnet Radiation(keV)	247			396			604		
ID Radiation(keV)	81	36	18	103	46	23	127	56	28
Parasitic Modes(keV)	50			50			50		
Total Loss U_0 (keV)	378	333	315	549	492	469	780	710	682
Overvoltage Factor	3.97	4.32	4.47	3.37	3.62	3.73	2.92	3.09	3.1
Peak RF Voltage(MV)	1.5	1.44	1.41	1.85	1.78	1.75	2.28	2.19	2.15
No. of Cavities Required	3	2	2	3	3	3	4	3	3

*Case I is for undulators with a field of 0,7T , each 5m long, One wiggler with a field of 2,4T and 2m long can be included (SRSA).

여기서, E_0 =beam energy

α =momentum compaction factor

h=harmonic number

$$\frac{\epsilon_{max}}{E_0} = \text{rf acceptance}$$

상기한 종축방향 운동량의 범위는 빔의 수명을 결정하는데 중요한 역할을 하게 되는 것이다. 표 2에서는 현재의 격자설계에 의한 각종 에너지 손실과 추가전압을 및 요구되는 최대 가속전압을 보여주고 있다. 여기서 ID는 Insertion Device를 의미하며, 이는 짧은 파장의 자석들의 배열로 전자빔을 상하(좌우) 운동시켜 더욱 강력한 방사광을 얻을 수 있게 하는 장치를 말한다.

또한 critical energy ϵ_c 는 방사광의 스펙트럼에서 median치를 의미하며, 또한 일반적으로 critical energy의 4배 까지는 사용이 가능하다고 여겨지므로 $4\epsilon_c$ 도 보여주고 있다.

다음 세가지의 에너지 손실을 계산했는데 bend magnet radiation은 주 휨자석들에 의한 에너지 손실을 의미하고, ID radiation은 Insertion Device들에 의한 빔 에너지 손실을 의미하고 parasitic mode

는 진공 chamber에 유기되는 wake field에 의한 빔 에너지 손실을 의미한다. 이것은 또한 진공 chamber의 총 임피던스로 표시되는데 표 2에 표시된 50 KeV/turn은 다른 가속기들의 수치를 보고 예상되는 수치를 가정한 것이다.

다음에 보여준 추가전압율(overvoltage factor)및 최대가속 전압의 요구사항은 충분한 quantum lifetime은 (>3,000시간)을 유지하는데 필요한 전압이다. 이 quantum lifetime은synchrotron radiation의 quatum nature에 의한 것이지만, 실제로 저장링에서는 한 beam bunch 내에 있는 전자들이 서로의 coulomb 산란에 의해 횡축방향으로의 운동량이 종축방향으로 옮겨지게 되고 이에 의해 에너지가 달라질 수 있는데, 이 결과에 의한 운동량의 변화가 저장링이 받아들일 수 있는 운동값의 범위보다 크게 되면 전자를 잃게 된다. 이러한 현상에 의해서 빔의 수명이 줄어들게 되는데 이를 Touschek효과라 한다. Touschek lifetime을 충분히 보장하기 위해서는 표 2에 주어진 것보다 약간 높은 전압을 걸어주어야 한다.

표 2의 마지막 열은 필요한 최소한의 가속공동 숫자를 나열하고 있는데 이는 공동 한개당 750KV를

표 3. RF Power Budget with 2 ID's of SRSA Type

MACHINE ENERGY = 2.0 GeV

		<u>OVER VTG.</u>	<u>RF (MV)</u>	<u>RF BUCKET (%)</u>	<u>TAUQ(SEC)</u>				
		4.47	1.41	1.98	0.19E+14				
I(Amp)	PBM(kW)	PID(kW)	PC(kW)	PARA(kW)	MISC(kW)	TOTAL(kW)	NO.	POWER/CAV.	
0.10	24.71	1.80	124.26	5.00	15.58	171.35	2	85.67	
0.20	49.43	3.60	124.26	10.00	18.73	206.01	2	103.01	
0.30	74.14	5.40	124.26	15.00	21.88	240.68	2	120.34	
0.40	98.86	7.20	124.26	20.00	25.03	275.34	2	137.67	

MACHIN ENERGY = 2.25 GeV

		<u>OVER VTG.</u>	<u>RF (MV)</u>	<u>RF BUCKET (%)</u>	<u>TAUQ(SEC)</u>				
		3.73	1.75	1.99	0.69E+10				
I(Amp)	PBM(KW)	PID(KW)	PC(KW)	PARA(KW)	MISC(KW)	TOTAL(KW)	NO.	POWER/CAV	
0.10	39.59	2.28	127.60	5.00	17.45	191.92	3	63.97	
0.20	79.17	4.56	127.60	10.00	22.13	243.47	3	81.16	
0.30	118.76	6.83	127.60	15.00	26.82	295.02	3	98.34	
0.40	158.35	9.11	127.60	20.00	31.51	346.57	3	115.52	

MACHINE ENERGY = 2.50 GeV

		<u>OVER VTG</u>	<u>RF (MV)</u>	<u>RF BUCKET (%)</u>	<u>TAUQ(SEC)</u>				
		3.15	2.15	1.98	0.17E+08				
I(Amp)	PBM(KW)	PID(KW)	PC(KW)	PARA(KW)	MISC(KW)	TOTAL(KW)	NO.	POWER/CAV	
0.10	60.34	2.81	192.60	5.00	26.08	286.83	3	95.61	
0.20	120.67	5.63	192.60	10.00	32.89	361.79	3	120.60	
0.30	181.01	8.44	192.60	15.00	39.71	436.76	3	145.59	
0.40	241.35	11.25	192.60	20.00	46.52	511.72	3	170.57	

공급해줄 수 있는 것을 가정한 것이다. 전자빔의 에너지가 2.0 GeV에서 2.5 GeV로 올라갈 때, 필요한 공동의 갯수는 최소 2개에서 4개까지 변하게 됨을 알 수 있다.

5. 필요 고주파전력

필요한 고주파 전력(power)은 저장된 전류(전자의 갯수)에 비례할 뿐 아니라, 설치된 가속공동의 갯수에도 상관된다. 여기에서는 표 2에서 계산된 최소한의 필요갯수를 이용해서 고주파전력을 계산하였다. 이러한 경우에는 공동의 총 임피던스가 작기 때문에 공동에서 소모되는 전력이 크게되는 단점이 있으나 전자빔의 안정도는 가장 좋은 경우이다.

표 3에서는 저장된 전류가 100, 200, 300 및 400 mA일때 전자빔의 에너지가 2.0, 2.25, 2.5 GeV일때 필요한 전력을 보여주고 있다.

$PBM = U_{BM} I / e =$ Power loss due to bending magnet radiation

$PID = U_{ID} I / e =$ Power loss due to ID radiation

$PC = V_{rf}^2 / Z =$ Ohmic losses in the cavities

$Z =$ total cavity impedance = $8M\Omega \times$ (no. of cavities)

PARA = Power loss due to parasitic modes

MISC = miscellaneous power losses due to reflection, etc.

= 10% of (PBM + PID + PC + PARA)

표 3의 경우에 있어, 저장된 전류가 400(mA)이면

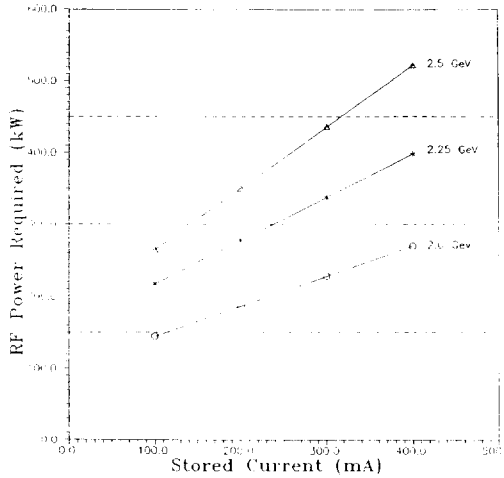


그림 3. RF Power Requirement vs. Stored Current for 3 different beam energy levels (with 9 ID's of SRSA type, with minimum number of cavities required)

필요한 고주파전력은 전자빔의 에너지가 2.0GeV에서 2.5GeV로 변할 때 175KW에서 512KW까지 변한다. 이는 다시 말하면 300/350KW급 Klystron에서부터 600KW급의 Klystron까지가 필요함을 말한다. 저장된 전류가 100mA로 낮아져서, 필요한 고주파는 171KW에서 287KW임을 알 수 있다. 그림 3은 저장된 전류와 필요한 고주파 전력이 거의 선형으로 변함을 보여주고 있다.

5.1 cavity 한개당의 고주파 전력

다른 가속기들로부터의 경험에 의하면 Cavity 한개에 공급되어야 하는 전력도 총 필요전류에 못지 않게 중요하다. 이것은 Cavity에 공급되는 전력은 모두 세라믹 window를 통해 공급되고, 또 이에 따라 window의 가공, 물질 또는 냉각등이 상당히 어려워지고 또 실제로 많은 문제점이 발생했기 때문이다. 표 3에서는 최소한의 Cavity를 쓴 결과이지만 Cavity 한개당의 고주파전력은 85KW에서 최대 170KW까지임을 알 수 있다. 이는 일본 Photon Factory의 설계치인 250KW보다 30% 가량 낮은 수치이므로 PLS에서는 큰 문제가 되지 않을 것으로 보인다.

5.2 Cavity 한개당의 소모전력

Cavity 자체에서 열로 소모되는 전력은 공급되는 전력의 상당부분을 차지하고, 또한 이것이 Cavity의 냉각시스템을 설계하는 데 중요하므로, Cavity 한개당의 소모전력도 중요한 지수가 된다. 최악의 경우 (최소한의 Cavity 숫자)인 표 3에서 보면 PC는 124KW에서 192KW까지로 Cavity 한개당의 소모전력은 62KW에서 68KW정도로 이는 Photon Factory의 설계한계인 110KW에는 훨씬 못 미치나 영국 SRS의 설계인 50KW보다는 상회하고 있음을 알 수 있다. 영국의 설계를 따르면 Cavity 숫자를 늘려서 개당 소모전력을 줄여야 할 것이다.

6. 고전력 고주파시스템의 설계

고전력 시스템은 여러 가지 방법으로 설계될 수 있다. 사용되는 Cavity 숫자를 최소한으로 구성할 수 있고, 또 숫자를 늘려서 총 임피던스를 크게하여 총 전력을 절약할 수도 있다. 숫자가 많아지면 Cavity system의 가격이 물론 올라가고, control system이 복잡해지지만 Klystron 및 그 power supply가 작아질 것이다. 이는 또한 고주파빌딩을 작게하는 부수효과도 가진다.

현재까지의 계산에 의하면 최대한으로 필요한 가속공동의 갯수는 4개인데, 그림 4에서는 개략적인



그림 4. Approximate Layout for 4 cavities.

2.5 GeV Options				
	(6) 3 CAV	(7) 4 CAV	(8) 4 CAV	(9) 4 CAV
Max. Oper. cur	100 mA	200 mA	200 mA	100 mA
Max. ID's	6	8	8	8

그림 5. Comparison between Options

배치를 보여주고 있다. 이들이 3.3미터를 차지하여 총가용한 길이의 반 정도를 차지함을 알 수 있다.

그림 5에서는 전자빔의 에너지가 2GeV 및 2.5 GeV인 경우에 대한 많은 가능성을 보여주고 있다. 그림에 쓰인 180, 60, 300, 350 등의 숫자는 쉽게 구할 수 있는 Klystron 등의 정격(KW)을 나타낸다.

초기의 저전류(100mA) 상태에서는 2.0GeV의 option 1과 2.5GeV의 option 6이 가능하다. Option 3은 작은 Klystron을 사용하게 때문에 부피가 큰 도파관 대신에 동축 케이블을 사용할 수 있다는 장점이 있다. Option 2는 Cavity를 한개 더 쓴 대신에 작은 Klystron과 동축 케이블로 200mA까지의 전류를 저장할 수 있다. 이러한 형식 즉, 각각의 Cavity가 서로 다른 Klystron으로부터 전류를 공급받는 형식은 Cavity간의 간섭이 없고 또한 redundancy 측면에서 가장 좋은 형태이다. 이 option 2는 또한 option 4로 쉽게 개선될 수 있을 것이다. Option 4는 2GeV에서는 400mA까지의 전류, 또 2.5GeV에서는 100mA까지 사용될 수 있다. PLS에서는 현재 초기에는 option 2에서 시작하여 나중에 option 4로 개조하는 것을 검토 중이다.

2.5GeV에서는 4cavity system(option 7)이 200 mA까지 사용될 수 있다. Option 5와 option 8은 현재 일본에서 사용되는 형식으로서 PLS에서 사용될 경우 에너지에 따라 200mA 또는 400mA까지 사용될 수 있다.

7. 결 론

현재까지 진행된 저장링 격자의 기본설계에 따라, 고주파 시스템 특히 Cavity와 고전력 고주파시스템의 기본 요구사항 및 기본구조를 보여주었다. 이외에도 저장링의 고주파시스템은 아주 잘 설계된 정밀 고주파회로의 뒷받침을 받아야 하는데 이에 대한 설계는 아직 초기단계에 있다. 안정된 500MHz 전원 에서부터, Cavity 내부 및 외부, 또 Klystron의 출력 등등의 상태를 파악하는 amplitude 및 phase detector들, 또한 phase shifter, 신호감쇄기, 튜너 등이 많은 feedback 회로를 통해 서로 연결되어 각종 고, 저전력 시스템을 control 하고 Cavity 간의

위상을 맞추어 주어야 한다. 또한 이 모든 system은 computer control 및 manual control이 가능해야 하고, 고압(~50KV), 고전류(~15A)가 사용되고 또한 Cavity 자체가 전체 저장링의 진공 시스템을 파괴할 수도 있으므로 이에 대한 초고속의 안전 relay 시스템도 설치되어야 한다.

충분한 빔의 수명을 위한 최대전압은 1.5MV 내지 2.3MV로서 3개 또는 4개의 Cavity가 필요하고, 필요전력은 최소 171KW에서 최대 512KW까지임을 보여 주었다. 여러 가지 가능한 layout에서 PLS에 적합한 구조를 선택하였으며, 기존 가속기들에 사용된 기술수준을 능가하는 특별한 요구사항은 없음을 보여주었다.

참 고 문 헌

- 1) Cho Y., "Preliminary Panning Document for PLS," Aug., 1987
- 2) Nam, K. and S. Hahn, "PLS Lattice," PLS TR/BD 88-07, Dec., 1988.
- 3) Pellegrini et.al. (SRSA Inc.), "Preliminary Design Study and Planning Report, PLS," June 1988.
- 4) Faillon, G., "New Klystron Technology," IEEE Trans. on NS, vol.NS-32 (5) oct., 1985, pp.2945-2947
- 5) Namkung, W., "RF Sources:Review," presented at POSTECH, Dec., 1984.
- 6) Varian Microwave Tube Div., "Varian Microwave Tubes," Oct., 1984.
- 7) Toshiba Microwave Tubes catalog, 1988.
- 8) Photon Factory Activity Report 82/83.
- 9) Photon Factory Activity Report 1987.
- 10) Bassetti, M. et.al., "Magnet Lattice for Synchrotron Trieste," ST/M-87/10.
- 11) ANL, "7 GeV APS Conceptual Design Report," APR., 1987.
- 12) LBL, "1-2 GeV Synchrotron Radiation Source CDR," July 1986.
- 13) Kustom, R. et.al., "The RF system of the Synchrotron X-ray source at Argonne," IEEE Pub. CH 2387-9/87, pp.1910-1912.

-
- 14) Batchelor, K., "Note on the proposed RF parameters for the Photon Factory," KEK-79-26, Oct., 1979.
 - 15) Kobayakawa et.al., "Suppression of Beam Instabilities Induced by Accelerating Cavities," to be published in ReV. of Scientific Instru., April 1989.
 - 16) Kim, Young S., "Preliminary RF System Design for the 2 GeV Storage Ring of the PLS," PLS TR/RF 88-03, Sept., 1988.
 - 17) Kim, Young S., "A Rough Estimation of the RF System Budget for a 2.5GeV Storage Ring," PLS TR/RF 88-04, Sept., 1988.
-