

차세대 가속기용 공동형 빔위치 측정기 개발

김승환^{1*} · 박용정¹ · 황운하¹ · 황정연¹ · Y. Honda^{1,2} · Y. Inoue^{1,2}

¹포항가속기연구소, 포항 790-784

²KEK (일본 고에너지 가속기 연구기구), 이바라키현 츠크바 305-0801, 일본

(2006년 3월 24일 받음)

국제 직선형 충돌 가속기 (ILC; International Linear Collider), 자유전자 레이저 (FEL: Free Electron Laser)와 같은 차세대 가속기에 사용할 공동형 빔위치 측정기 (공동형 BPM: cavity-type beam position monitor)를 일본 고에너지연구소 (KEK; High Energy Accelerator Research Organization)와 공동으로 개발하였다. ILC 및 FEL의 운전을 위해서는 빔 기반 정렬 (beam-based alignment)과 되먹임 장치 (feedback system)가 필수적으로 요구되는데, 이를 위해서는 적절한 위치에 서브마이크론의 분해능을 지닌 빔위치 측정기를 설치하여야 한다 [1].

공동형 BPM은 기계적인 정밀도에 매우 민감하므로 정밀한 제작과 미세한 기계적 조정을 통하여 성능을 달성하게 된다. 우리는 제작 오차를 줄이기 위하여 공진 공동, 빔 튜브, 도파관, 전기도입기 등 모든 부품을 조립 후 한꺼번에 진공 브레이징 하였다. 공동의 외주면에는 네 개의 튜닝 핀을 두어 공진주파수 및 x-y 격리도 (x-y isolation between coupled waveguide)를 미세 조정할 수 있도록 하였다. 현재 개발된 공동형 BPM은 공진주파수는 6.422 GHz이며, 공동 내경은 53.822 mm, 빔의 위치 측정 범위는 $\pm 250 \mu\text{m}$ 이다. network analyzer를 관측하면서 튜닝핀을 이용하여 x-y 격리도를 -40 dB 이하로 조정할 수 있었다. 실제 KEK ATF2에서의 전자빔을 이용한 시험에서 신호의 모양, x-y 격리도, 민감도 등에서 만족한 결과를 얻었다.

주제어: BPM, Beam position monitor, 공동형 빔위치 측정기

1. 서 론

포항가속기 연구소에서는 자체방출 자체증폭형 (Self Amplification of Spontaneous Emission: SASE) 자유전자 레이저 장치의 설계를 진행하고 있다 [2]. FEL의 성공적인 운전을 위해서는 빔 기반 정렬과 되먹임 장치가 필수적으로 요구되며, 이를 위해 적절한 위치에 높은 분해능의 BPM이 설치되어야 한다. SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, USA), BINP (Budker Institute of Nuclear Physics, Russia), DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron, Germany), KEK 등의 가속기 연구소에서 빔의 위치를 정확히 측정하기 위한 장치를 사용하고 있거나 더욱 정밀한 BPM의 개발을 진행하고 있다 (표 1) [1].

포항가속기 연구소에서도 KEK와 공동으로 2005년도부터 공동형 BPM을 개발하고 있다. 이 빔위치 측정기는 전자빔이 중심으로부터 벗어남에 따라 선형적인 응답성을 지니며 신호 강도가 우수한 TM110 모드의 원형 공동을 가지는 구조로 설계하였다. 또한 전자빔을 케드로부터 수 마이크로 범위에 안정시키기 위하여 단위 번치 (single bunch)에 대하여 $0.2 \mu\text{m}$ 측정 분해능과 $500 \mu\text{m}$ 의 측정 범위를 가지며, 사극자석에 직접 설치할 수 있는 간단한 구조로 설계하였다.

II. 설계 및 제작

BPM의 전산모사 및 기본적인 구조의 결정은 SLAC에서 개발한 검출회로를 사용하여 KEK의 ATF2에서 빔 실험을 하는 것으로 하여 진행되었다.

* [전자우편] yunsori@postech.ac.kr

표 1. 세계의 여러 가속기에서 개발 중이거나 개발 완료된 빔위치 측정기.

연구소	가속기	BPM 모양	f ₁₁₀ (GHz)	Q-values		분해능 (μm)	Excitation(min.)	
				Q0	QL		전류(cw)	charge
Mainz	MAMI	cyl.	2.449	9300	6100	50	1 nA	-
SLAC	SLC	rect.	2.856			10	100 μA	-
CERN	CLIC	cyl.	30,000			0,1	-	1 nC
TJNAF	CEBAF	cyl.	1.497		3500	10	1 nA	-
DESY	TTFL	cyl.	1.517		1000	10	5 mA	8 nC
KEK	JLC	cyl.	5.712		140	0,025	-	(1 nC)
Mainz	MAMI	cyl.	9.795	7500	2500	(2)	1 μA	-
DESY	FEL	cyl.	12,000		1000	10	-	1 nC
BINP	VLEPP	cyl.	14,000			0,010	-	(?)

따라서 BPM 공동은 pill-box 형식으로서 TM110 모드를 사용하며 (그림 1), 공진주파수는 C-밴드에 해당되는 6.426 GHz로 제한되었다. 사극 전자석에 직접 설치하여 사극자석의 자장중심으로부터 수 μm 안에 빔을 위치시키기 위하여 위치 분해능은 0.2 μm, 측정범위는 500 μm로 결정하였다. 네 개의 도파관을 x-y축 선상에 배치하고 공동의 한쪽 면과 1.5 x 13 mm의 네모난 구멍 (slot)으로 연결하여 자기 결합 (magnetic coupling)이 이루어지도록 하였다 (그림 2) [3].

반사를 최소화하고 출력을 증가시키기 위하여 SMA 단자의 모양과 크기 및 위치를 전산모사 (HFSS)를 통하여 최적화하였다. 또한 커플링 구멍을 통해 도파관으로 누설된 common mode (TM010)의 검출을 최소화하기 위해 빔 진행 방향의 도파관의 길이는 50 mm로 결정하였다. x-y 격리도를 향상시키기 위하여 공동의 원주면에 두 개의 홈 (dents)을 대칭되도록 만들어 홈이 없는 경우와 비교하여 실험한 후 결정하기로 하였으며, -30 dB를 한계 값으로 결정하였다.

반경 3 mm, 길이 11 mm, 깊이 0.1 mm의 공동 홈이 두 개 대칭으로 있을 때와 공동 홈이 없을 때를 전산모사 (HFSS)로 비교한 결과 공진주파수가 약 500 kHz 낮게 해석되었다.

제작과정에서 발생하는 오차 (가공, 접합)가 공진주파수를 변형시키는 데에 대한 대책으로 x-y 축과 45° 되는 공동의 외주 면에 튜닝 핀을 만들도록 하였다. 튜닝 핀은 공진주파수의 조정과 공동의 대칭성을 향상시키는데도 사용된다. 도파관에 유기된 전압을 외부로 전달하기 위한 SMA 단자를 도파관의 넓은 면에 설치하였다. SMA 단자의 위치 오차에 의한 인가 전압 오차를 줄이기 위해 공동과 동시에 브레이징 접합하도록 하였으며, 이를 위하여 SMA 단자 제작 단계에서 용융점이 780°C 이상인 브레이징용 은납을 사용하도록 미리 규제하였다.

가공과 브레이징 오차가 공진주파수 및 x-y 격리도에 미치는 영향을 확인하고 최적의 공정을 도출을 위해 시제품을 제작하였다. 공동은 천연 다이아몬드 공구를 사용한 선반가공으로 Rmax 0.3 이하의 표면

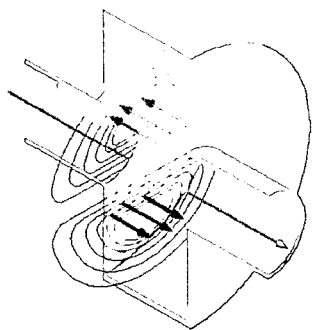


그림 1. TM110 모드를 사용하는 공동형 BPM의 개념도.

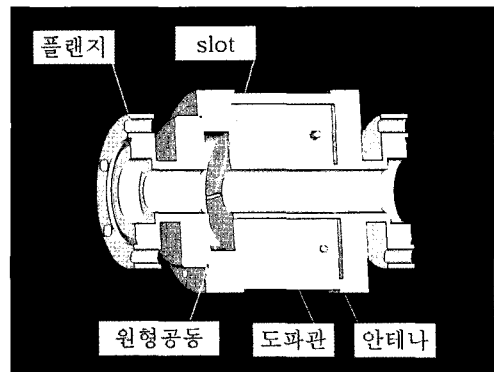


그림 2. 공동형 BPM의 3차원 그림

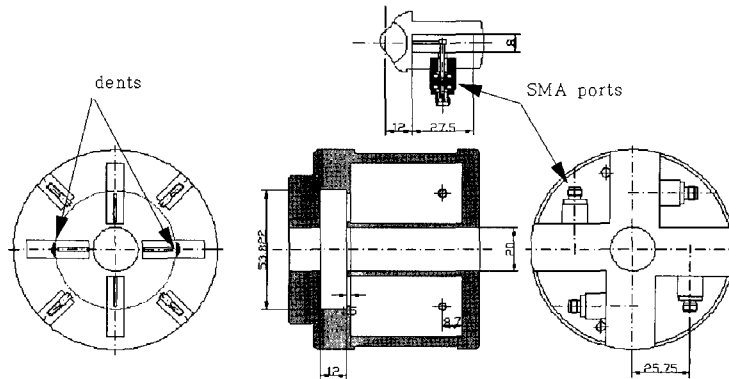


그림 3. 모델 BPM의 2차원 형상

표 2. 브레이징 전후의 RF parameter 측정값

model	dents	rf contact	Before brazing			After brazing		
			Q0	f(GHz)	isolation	Q0	f(GHz)	isolation
#1	Yes	tight	8151	6.41775, 6.41705	-44.1 dB	7229	6.42024, 6.41952	-21.7 dB
		loose	3775	6.41843, 6.41795	-19.8 dB			
#2	No	tight	7641	6.41709	-29.6			
#2-m	Y-DD	tight	5012	6.41725, 6.41445	-47.7 dB	6928	6.41908, 6.41629	-30.7 dB
#3	Yes	tight		6.418, 6.417	-23 dB	7163	6.42051, 6.41979	-20.1 dB
#4	No	tight	7222	6.41764	-19.4 dB	7556	6.42082	-28.7 dB
		loose	5198	6.41880	-18.7 dB			

☞ #2-m은 #2 모델에 깊이 0.35 mm dents를 가공한 것.

을 얻을 수 있었으며, 도파관과 사각 구멍 부분은 와이어커팅 방법으로 가공하였다. 도파관과 공동의 가공오차는 10 μm 이하로 요구 사양을 만족하였다. 공동과 도파관 사이의 벽은 1 mm로 설계하였으나 가공 및 브레이징에 의한 변형이 발생하여 1.5 mm로 변경하였다. 공동, 도파관, 튜브, SMA 단자 등 모든 부품은 직경 1 mm와 0.5 mm 와이어형의 브레이징 은납을 삽입하여 조립단계에서 치수정밀도가 확보되게 하였다. 여러 단계의 브레이징 공정으로 인해 발생하는 열응력에 의한 SMA 세라믹의 파괴를 방지하고 접합부의 조립 정밀도를 쉽게 확보하며, 접합면의 용가제 충전의 차이에 의한 공진주파수의 변화량을 일정하게 유지하기 위하여 모든 부품을 동시에 브레이징 하였으며, 이때 사용한 브레이징 은납의 용융점은 720 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

III. RF 특성 분석

공동 원주면에 홈을 가진 모델과 홈이 없는 모델을 제작하여 각각의 RF 특성을 측정하였다 (그림 3). 도파관에 부착된 SMA 단자에 network analyzer를 연

결하고 각각의 포트에서의 공진주파수와 반사계수, 전달계수를 측정하였다. network analyzer와 연결되지 않은 포트에는 50 Ω terminator를 연결하였다.

먼저 브레이징에 의한 영향을 확인하기 위하여 브레이징 전후의 RF 특성을 측정하였다. 이때 접촉면에서의 좋은 전기적 접촉을 확보하기 위하여 양쪽에서 나사로 조이는 모양의 지그를 사용하였다. 브레이징 전에 측정한 공진주파수는 공동의 직경이 53.822 mm 일 때 6.417 GHz인 것으로 나타났다. 브레이징 후의 공진주파수는 6.4195 GHz 정도로 나타나 브레이징에

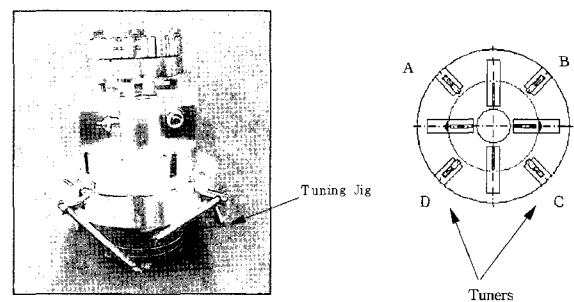


그림 4. 공동 튜닝 공구와 튜너의 위치

의해 공진주파수가 약 2.5 MHz 증가하였다. 한편 대기압상태와 진공상태의 공진주파수를 측정한 결과 진공 상태에서의 공진주파수가 약 2 MHz 높은 것으로 나타났다. 결과적으로 브레이징 후 진공상태에서의 공진주파수는 약 6.4215 GHz로 측정되었다 (표 2).

튜닝 핀을 사용하여 x-y 격리도 튜닝을 실시하였다. x-y 격리도는 $20 \log \frac{S_{21}(A,B)}{S_{21}(A,C)}$ 로 정의되며 BPM 공동의 대칭성에 민감하게 변화하므로, 공동의 튜닝은 그림 4에서와 같이 튜닝 핀을 사용하여 공동 원주면의 불균일성을 해소하는 방향으로 공동 내면을 인위적으로 변형시키는 작업으로서 직각 방향 포트로의 전기신호의 전달을 최소화 하는 것이다 (그림 5). Network analyzer로 A-C 포트의 S21과 A-B 포트의 S21을 비교하면서 각각의 튜닝 핀을 특별한 치구로 밀고 당기면서 진행하였다. 조정 후 x-y 격리도는 -50 dB보다 좋은 값을 보였다 (표 3) [4].

현장설치를 위하여 BPM 공동의 전기신호의 중심 (electrical center)과 기계의 중심 (mechanical center)을 측정하였다. KEK의 안테나 측정기를 사용하여 각각의 포트를 network analyzer에 연결하고 공동 내면에 안테나 탐침을 넣고 좌우로 움직이면서 전기신호의 중심과 공동 외주 면을 기준으로 한 기계의 중심과의 오차를 확인하였다. 측정결과 전기신호의 중심은 기계의 중심으로부터 평균 4 μm, 최대 10 μm 이내의 위치 오차를 가지고 있었고 ± 20 μm의 허용치 범위 내에 있었다 (표 3).

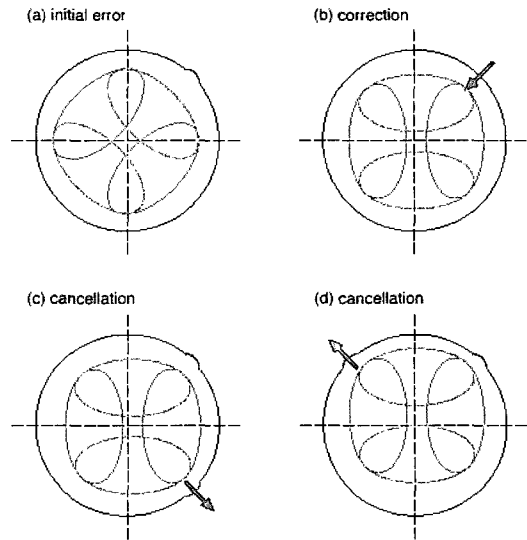


그림 5. 공동 튜닝 방법: (a) 제작공정에서 발생한 에러에 의하여 발생한 TM110 모드의 왜곡; (b) 튜닝에 의해 에러를 제거했을 때 교정된 TM110 모드; (c)(d) 튜닝에 의하여 TM110 모드는 교정되었으나 중심이 벗어난 모양.

IV. 현장 적용 시험

튜닝을 마친 모델 #4 (without dents, x-y 격리도 -53.2 dB)를 KEK의 ATF2에 설치하여 현장 적용 시험을 실시하였다 [5]. 이 실험은 전자빔의 위치에 따른 출력 RF 신호의 크기를 측정하여 BPM의 감도를 측정하고, 빔에 의한 x-y 격리도를 실제 확인하기 위한 것이다.

그림 6은 감도 측정을 위한 BPM과 검출회로의 연결을 보여준다. TM110 모드에서의 마주보는 포트의

표 3. 측정된 x-y 격리도, 전기신호의 중심과 기계 중심의 오차

model		before brazing	after brazing	
			before tuning	after tuning
#1 dents	x-y isolation(dB)	-44.1	-21.7	-50.8
	e-center A-C(μm)		-4.0±3.3	-9.5±3.7
	e-center B-D(μm)		4.2±3.4	2.1±3.9
#2 deep dents	x-y isolation(dB)	-47.7	-30.7	-55.8
	e-center A-C(μm)		6.9±2.6	6.8±4.0
	e-center B-D(μm)		4.2±3.5	2.8±4.0
#3 dents	x-y isolation(dB)	-23	-20.1	
	e-center A-C(μm)			
	e-center B-D(μm)			
#4 no dents	x-y isolation(dB)	-19.4	-28.7	-53.2
	e-center A-C(μm)		6.2±4.8	6.9±6.3
	e-center B-D(μm)		1.6±3.7	1.1±2.4

출력 위상차는 180도이므로 최대 출력을 얻기 위하여 180 deg hybrid coupler로 출력신호를 합성하고 밴드패스필터 (BPF)를 거치면서 TM110 모드의 신호만 오실로스코프로 전달되도록 하였다. 다이오드의 출력은 오실로스코프로 측정하였으며, 검출회로의 총 이득은 cw oscillator를 사용하여 교정하였다. 그림 7은 다이오드 출력과 실제 출력의 차를 보정하기 위한 그래프로서 x-축은 diode detector 입력이고, y-축은 실제 검출신호의 크기이다. 반도체 검출기의 특징인 비선형 특성을 보여주고 있다.

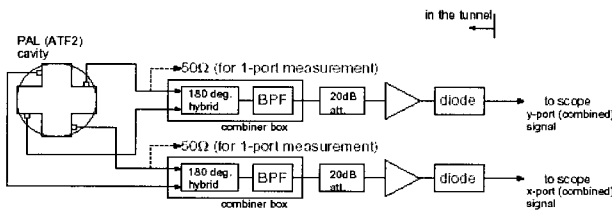


그림 6. 검출회로의 구성도

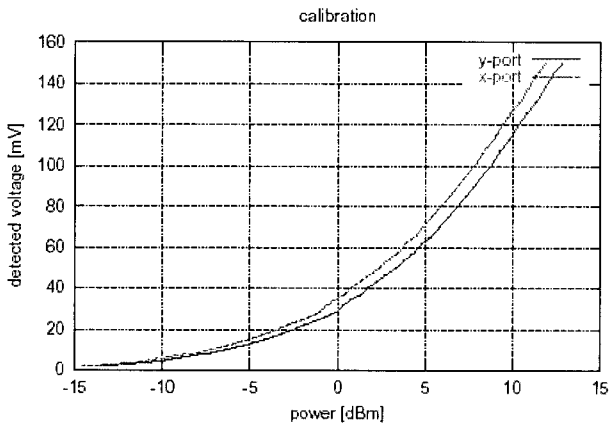


그림 7. 검출회로의 출력 보정 그래프

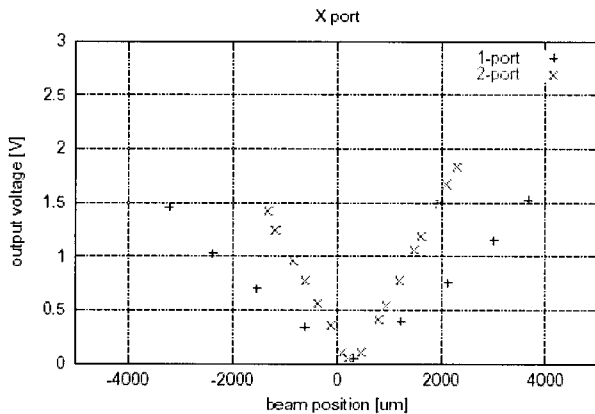


그림 8. BPM의 x-포트 출력

x-y 방향에 대하여 각각 한 개의 빔 위치 조정 전자석을 사용하여 BPM 전자빔 위치를 변경하면서 빔의 위치에 대한 BPM의 출력신호를 측정하였다. 공동형 BPM의 앞뒤로 전자빔 위치를 측정할 수 있는 별도의 strip-line BPM을 설치하여 공동형 BPM의 peak 출력과 비교하여 빔의 실제 위치를 확인하였다. 빔의 세기는 빔라인 끝에 설치된 ICT (Integrated Current Transformer)로 확인하였으며 8×10^9 e/bunch 였다. 측정을 시작하기 전에 x와 y 포트의 출력이 최소가 되는 위치를 확인하여 이를 BPM의 전기신호의 중심으로 사용하였다.

BPM 주변의 모든 전자석의 전원을 끄고 x와 y 가운데 한 방향의 조정 전자석의 출력을 변화시키면서 이 때 오실로스코프에 나타나는 빔의 위치에 대한 BPM 출력의 최대값 (peak voltage)을 측정하였다. 그림 8과 그림 9는 빔의 세기를 10^{10} e/bunch에 맞춘 빔 위치에 대한 BPM의 출력 값을 보여준다. 1-포트 측정은 1개의 SMA로부터의 출력 값을 나타내며, 2-포트 측정은 마주보는 2개의 SMA로부터의 출력 값을 합성하여 나타내는 것이다. 2-포트 측정에서 계산된 감도는 10^{10} e/bunch의 빔의 세기와 8 mm의 번치길이에서 0.8 V/mm이다. 이 계산 결과는 그림 8과 그림 9에서 보이는 바와 같이 실험 결과와 일치한다. 2-포트 측정의 신호 감도는 180 deg hybrid coupler를 이용하여 얻은 결과이며, 이는 BPM 공동의 TM110 모드에서 기대한 바와 같이 마주보는 포트의 위상이 서로 반대임을 보여 준다.

공동에서 쌍극자 모드간의 cross-talk을 살펴보기 위하여 x 방향으로 빔을 크게 움직이면서 y 방향 포트의 출력 값 변화를 확인하였다. x-포트는 그림 10과 같이 1-포트 측정으로 하였다. 측정결과 x-포트

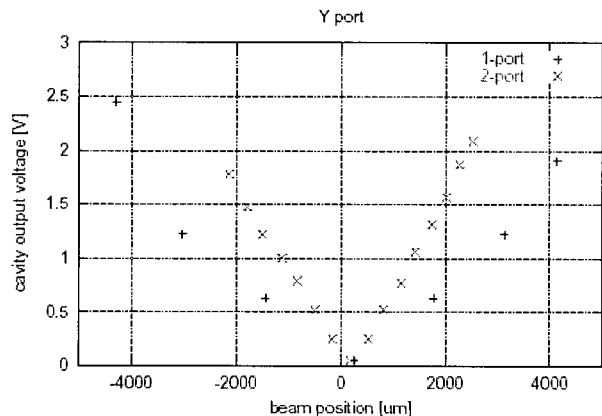


그림 9. BPM의 y-포트 출력

는 y-포트보다 23 dB 낮은 것으로 나타났다.

먼저 검출회로의 y-포트의 감도를 측정하였다. 이 결과 빔의 위치변화 50 μm에 대하여 출력신호는 약 10 mV로 나타났다 (그림 11). 이 검출회로를 사용하여 x 방향으로 각각 2.5 mm와 5 mm씩 빔의 위치를 변화시키면서 x, y 포트의 출력을 측정하였다.

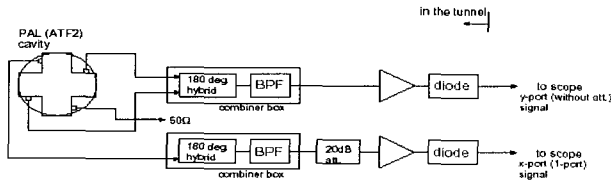


그림 10. x-y 격리도 검출회로의 구성도

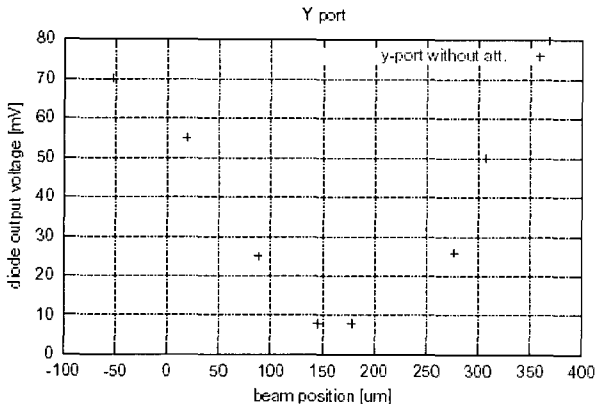


그림 11. BPM y-포트의 감도 (without attenuator)

이 결과 빔을 x 방향으로 5 mm 변화시켰을 때 y-포트의 출력은 10 mV 정도로서 길이로는 약 50 μm의 빔 위치변화에 해당 된다. 빔 위치와 출력 전압이 선형적이므로 앞의 실험에서 측정된 값으로 계산한 x-y 격리도는 $20 \log \frac{S_{21}(\text{transverse})}{S_{21}(\text{opposite})} = 20 \log \frac{0.05 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = -40 \text{ dB}$ 로서 매우 좋은 값을 얻었다 [6].

V. 결론

KEK와 공동으로 ILC 및 XFEL을 위한 공동형 BPM을 개발하였다. 공진주파수는 진공상태에서 6.422 GHz로서 목표값 6.426 GHz에 약 4 MHz 낮게 나타났다. 브레이징 접합이 공진주파수를 약 2.5 MHz 증가시키는 영향을 보였으며, 튜닝핀을 사용하

여 x-y 격리도를 충분히 개선할 수 있으므로 공동 원주면에 홈(dent)을 가공할 필요가 없는 것으로 확인되었다.

network analyzer를 관측하면서 튜닝핀을 이용하여 x-y 격리도를 약 -50 dB로 조정한 후 KEK ATF2에서 빔 실험을 하였다. 전자석을 이용하여 x-방향으로 빔을 5 mm 변화시켰을 때 y-방향의 검출단자에서 측정된 빔의 위치변화는 50 μm로 나타났으며, 이 값은 -40dB의 x-y 격리도로서 매우 좋은 결과를 얻었다. 공동형 BPM의 출력전압은 빔의 위치변화에 선형적으로 응답하는 특성을 나타냈으며, 검출회로의 잡음 제거능력의 보완과 진동을 흡수할 수 있는 지지대의 설치를 통해 0.2 μm의 분해능은 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단되며, KEK ATF2에서 계속 확인할 계획이다. 공진주파수를 6.426 GHz에 맞추기 위하여 공동의 직경을 53.822 mm에서 53.788 mm로 변경하여 최종 설계를 확정하였으며, 본 제품의 제작을 진행하고 있다.

참고 문헌

- [1] Ronald Lorenz, in 8th Beam Instrumentation Workshop, SLAC (1998), p. 1 & 21
- [2] PAL XFEL 개념설계 보고서, 포항가속기연구소, 2004.
- [3] Y. Honda, in KEK-PAL meeting, 2005. <http://acfahep.kek.jp/subg/ir/nanoBPM/index.html>.
- [4] Y. Honda, Woon-Ha Hwang, Seung-Hwan Kim, and Yong-Jung Park, KEK Report, October 2005. <http://acfahep.kek.jp/subg/ir/nanoBPM/index.html>.
- [5] Y. Honda, W. H. Hwang, Y. Inoue, and S. H. Kim, A. Liapine, S. J. Park, Y. J. Park, KEK Report, December 2005. <http://acfahep.kek.jp/subg/ir/nanoBPM/index.html>.
- [6] T. Hino, Y. Honda, W. H. Hwang, Y. Inoue, S. H. Kim, S. J. Park, and Y. J. Park, KEK Report, December 2005. <http://acfahep.kek.jp/subg/ir/nanoBPM/index.html>.

Cavity-type Beam Position Monitors for Future Accelerators

S. H. Kim^{1*}, Y. J. Park¹, W. H. Hwang¹, J. Y. Huang¹, Y. Honda^{1,2}, and Y. Inoue^{1,2}

¹*Pohang Accelerator Laboratory, Pohang 790-784*

²*KEK (High Energy Accelerator Research Organization), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

(Received March 24, 2006)

Cavity-type beam position monitors were developed in collaboration with KEK to use for the future accelerators such as international linear collider (ILC) or x-ray free electron laser (XFEL) in PAL. BPM components such as BPM cavity, beam tubes, waveguides and feedthroughs were assembled by brazing at the same time to reduce mechanical errors during the fabrication. There are four screwed pins around outer rim of the cavity for the tuning of cavity frequency and x-y isolation. The resonance frequency of BPM is 6.422 GHz, the inner diameter of cavity is 53.822 mm, and the range of mechanical adjusting is $\pm 250 \mu\text{m}$. The x-y isolation was measured better than -40 dB after tuned. Test results of signal forms, x-y isolations, sensitivities are satisfied within requirements for the KEK ATF2 beam line.

Keywords : BPM, Beam position monitor, Cavity-type beam position monitors, Vacuum brazing.

* [E-mail] yunsori@postech.ac.kr