

포항방사광가속기 2GeV 저장링용 전자석전원

장치의 운전경험

남상훈, 정성훈, 한성훈, 서재학, 하기만, 윤무현

포항가속기연구소 저장링부 전기공학실

Operation experience of 2 GeV PLS magnet power supplies

Sang H. Nam, Seong H. Jeong, Sung H. Han, Jae H. Suh, Ki M. Ha, and Moohyun Yoon

Electrical Engineering Group, Storage Ring Division, Pohang Accelerator Laboratory

Abstract

Total 215 magnet power supplies are under operation in Pohang Light Source(PLS). Current, voltage and peak power handling capabilities of DC power supply are in the range of 21 to 643V, 45 to 850A and 0.94 to 531KW, respectively. The DC power supplies can be categorized as uni-polar and bipolar power. Typical required stability and ripple of uni-polar power supplies are $\pm 0.005\%$ and $\pm 0.05\%$, respectively. The bipolar power supplies should be maintained within $\pm 0.05\%$ stability and $\pm 0.5\%$ ripple. Precise measurement results show that all power supplies meet or exceed the required specifications. The long term operation reliability to be sufficient for a stable operation of the Pohang Light Source.

1. 서 론

포항방사광가속기에서 사용되는 전자석 전원장치는 용도에 따라 크게 4가지로 나눌 수 있다. 그 첫째는 전자빔을 구부리는 데 사용되는 휨(또는 편향) 전자석에 전류를 공급하는 휨 전자석 전원장치이다. 둘째는 전자를 집중시키는데 사용되는 4극 전자석에 전류를 공급하는 4극 전자석 전원장치이다. 셋째는 초점의 색소 차를 보정하는데 사용되는 6극 전자석에 전류를 공급하는 6극 전자석 전원장치이다. 마지막으로 전자의 위치를 변경하는데 사용되는 보정 전자석에 전류를 공급하는 보정 전자석 전원장치이다. 위의 전자석 전원장치를 전기적 특성에 따라 다시 분류하면 크게 단방향 전원장치와 양방향 전원장치로 나눌 수 있다. 용도에 따른 분류 중 첫째부터 셋째까지의 전자석 전원장치인 휨 전자석 전원장치, 4극 전자석 전원장치, 6극 전자석 전원장치는 단방향이며 넷째 분류에 속하는 보정 전자석 전원장치는 양방향이다. 포항방사광가속기의 저장링을 구성하는 데는 총 215대의 전자석 전원장치가 필요하며 전원장치의 요구 사양은 가속기 하전 입자의 광학계의 구성에 따라서 결정된다. 제 3 세대 방사광가속기 구성에 요구되는 각종 사양과 전자석 전원장치의 종류 및 개수는 표 1에 보여진다. 표 1에 나타난 전원장치의 안정도에 대한 성능 사양은 저장링에 대한 tune shift의 허용 오차 및 빙 위치 안정도에 대한 요구 조건에 의존하는 것으로, 전류안정도는 전원전압의 변동, 부하 변동, 소자의 드리프트 및 10~40°C 범위에 대한 온도 변화에 대한 드리프트 등을 고려한 안정도이다. 포항가속기연구소가 준공된 이후부터 현재

까지 저장링에 설치된 모든 전원장치를 운전하면서 별다른 고장이 발생하지 않고 성공적으로 임무를 수행하므로서 포항방사광가속기의 운전에 안정을 기하여, 전자빔을 사용하는 사용자에게 양질의 전자빔을 제공하고 있다. 본 논문에서는 포항방사광가속기의 저장링에 사용되는 여러 가지 전원장치들의 구조 및 성능 사양과 측정한 결과를 나타내고, 약 2년에 걸친 포항방사광가속기의 운전 기간 중에 일어난 전자석 전원장치의 운전 경향을 소개하고자 한다.

표 1. 저장링의 전자석 전원장치

Table 1. Magnet power supply specifications

	No.	I (A)	V (V)	Output ripple $\Delta I/I_{max}$ (%)	Stability $\Delta I/I_{max}$ (%)	Linearity $\Delta I/I_{max}$ (%)
BD	1	850	643.0	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q1	12	137.32	83.9	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q2	12	137.32	133.5	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q3	12	137.32	101.4	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q4	1	600	326.2	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q5	1	600	421.7	± 0.05	± 0.005	± 0.02
Q6	1	600	268.0	± 0.05	± 0.005	± 0.02
SF	1	198	179.8	± 0.5	± 0.05	± 0.2
SD	1	198	179.8	± 0.5	± 0.05	± 0.2
SQ	4	± 17	± 55.5	± 0.5	± 0.05	± 0.2
HC	70	± 45	± 21.0	± 0.5	± 0.05	± 0.2
VC	70	± 110	± 21.0	± 0.5	± 0.05	± 0.2
SHU	12	± 16	± 55.5	± 0.5	± 0.05	± 0.2
SVD	12	± 13	± 55.5	± 0.5	± 0.05	± 0.2
BT	4	± 10	± 31.1	± 0.5	± 0.05	± 0.2
SP	1	200	49	± 0.5	± 0.05	± 0.1

2. 본 론

포항방사광가속기의 저장링에 설치된 전자석 전원장치들의 운전형태는 전자석 부하의 히스테리시스 영향을 최소화하기 위하여 Cycling 과정을 거친 후 부하의 전류 값을 설정하게 된다. 단방향 전원장치인 Bending, Quadrupole, Sextupole, Septum의 경우, 전류 값을 0에서 시작하여 최대 값에 도달한 후 다시 0으로 감소시키는 과정을 3번을 거친 후 설정하는 전류 값에 도달하게 된다. 이러한 과정을 거치는데 소요되는 시간은 약 1분 20초정도 소요된다. 양방향 전원장치인 Horizontal Corrector,

Vertical Corrector, Bending Trim, Sextupole Horizontal Corrector, Sextupole Vertical Corrector의 경우에는 전류 값을 0에서 시작하여 (+)최대 값에 도달한 후 (-)최대 값으로 감소시키는 과정을 3번을 거친 후 설정하는 전류 값에 도달하게 된다. 이러한 과정을 거치는데 소요되는 시간은 약 30초 정도 소요된다. 1995년도 방사광가속기의 정상 가동은 9월 1일 09:00 시작하여 12월 23일 09:00에 끝을 맺었다. 이 기간 동안 각 장치별 고장 횟수 및 시간을 고주파 가속장치, 전자석 전원장치, 전자석, 진공, 제어계통, 저전도수, 그리고 선형 가속기로 구분하여 표 2에 보이고 있다.[1]

표 2. 저장링 가동중 부품별 실패 통계표

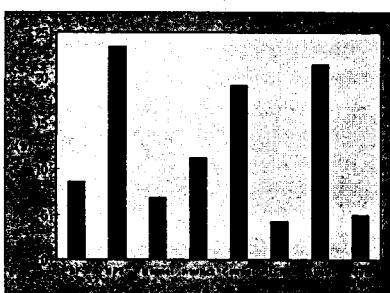
Table 2. Failure statistics of storage ring machine devices

부품	횟수	시간(분)	퍼센트(%)
RF	9	210	0.59
MPS	11	576	1.61
magnet	1	169	0.47
vacuum	4	33353	93.15
interlock	8	273	0.76
control	10	470	1.31
LCW	3	106	0.30
injector	9	526	1.47
power failure	1	122	0.34

위 표는 9월 1일 이후 이용자가 실험을 하고 있을 때뿐만 아니라, 그 외 전자빔의 특성연구를 위하여 저장링을 가동하고 있을 때의 모든 시간에 걸쳐 집계한 결과이다. 이 중 전자석 전원장치의 고장 횟수는 11회이며 이를 수리하는데 소요된 시간은 576 분이었다. 위 표에서 진공을 제외한 나머지 장치가 차지하는 고장을 그레프로 표 3에 보였다.

표 3. 고장 시간으로 본 각 하드웨어 부품들의 실패 배분율(진공 제외)

Table 3. Bar chart of failure rate (excluding vacuum components)



이 도표는 진공을 제외한 나머지 장치들의 전체 고장 시간을 100%로 하였을 때 각 부품들의 고장 시간을 배분율로 보인 것으로 전원장치의 경우 23.5%를 차지하고 있다. 포항방사광가속기가 준공된 이후 저장링의 전원장치가 지금까지 운전을 수행하면서 발생했던 고장은 주로 통신상의 잡음으로 인한 제어기의 오동작, 전자석 전원장치의 스위칭으로 인한 잡음, 전자기판의 불량 등으로 인한 제어기 자체의 오류가 대부분이었다. 이러한 문제들은 어렵지 않게 조치할 수 있는 것으로서 전체 저장링의 운전에 큰 영향을 주지 않았다. 일반적으로 전원장치에

이 발생하는데 이런 경우 이를 수리하는데는 보다 많은 시간이 소요된다. 본 방사광가속기의 저장링에 설치된 전자석 전원장치에서 이런 종류의 고장은 발생하지 않았다. 또한, 현재까지 운전을 수행하면서 발생했던 문제들은 저장링의 전체 시스템이 안정되면서 현격히 줄어들고 있다.

전자석 전원장치들의 성능을 측정하기 위한 방법으로 개개의 전원장치의 AC 입력 단의 특성을 측정하고 DC 출력 단의 전압과 전류를 측정하였다. 또한 고압측(6.6 kV) 변압기 입력 단의 특성을 측정하였다. 측정에 사용된 장비로는 HOLEC 사와 DAN-FYSIK 사의 DCCT(10ppm)을 사용하였고 전압계는 HP3458A와 Fluke 8505A를 사용하였다. 또한 Volttech PM3000 power analyzer, HP35665A signal analyzer, Tek TDS744A O'scope, Tek AM503 current amplifier를 사용하였다. 이러한 장비를 사용하여 측정된 자료는 GPIB를 이용하여 컴퓨터(486DX-100MHz)에 연결되어 수집되고 정리되었다. 표 4는 개개의 전원장치의 AC 입력 전력과 DC 출력 전력 및 DC 출력 대 AC 입력의 유효 전력 비를 나타낸 것이다. 단방향 전자석 전원장치는 SCR 위상제어를 하고 있기 때문에 점호 각에 따라 역률이 증감된다. Bending, Q4, Q5, Q6에는 AC 입력측에 역률 보상용 콘덴서가 있으나 Q1, Q2, Q3에는 역률 보상용 콘덴서가 접속되어 있다. 이 표에서 Q1이 다른 전원장치에 비하여 효율이 낮은 것은 점호 각이 험저히 낮음을 나타낸다.

표 4. 각 전원장치의 AC 측과 DC 측의 소비전력.

Table 4. AC and DC power comparison of power supplies

	ACKW	DCKW	DC/AC(%)
BEND	329.8	282.55	85.67
Q1	0.842	0.57	67.7
Q2	6.66	5.8	87.1
Q3	6.2	5.6	90.3
Q4	59.17	48.8	82.4
Q5	113.17	97.9	86.5
Q6	17.1	12.7	74.3
SD	19.7	18.3	92.8
SF	10.7	8.8	82.2

표 5는 전원장치의 AC 입력 단인 고압(6.6KV)측 5대의 변압기에 설치된 PT, CT로 특성을 측정한 것으로 6.6 KV 전력 선의 각 상에 대한 특성 표이다. 전자석의 연결 방법에 따라 Bending, Q4, Q5, Q6, SD, SF는 각 전자석을 전체 직렬 연결하여 1대의 전자석 전원장치가 전류를 공급하며, Q1, Q2, Q3은 각 2개의 전자석을 직렬 연결하여 1대의 전자석 전원장치가 전류를 공급한다. 양방향 전자석 전원장치에는 각각의 전자석이 접속된다. 전자석 전원장치 입력측에는 5대의 고압변압기(6.6KV)가 있으며 Bending, Q4, Q5에는 독립 변압기, TR19에는 Q6, SD, SF가, TR6에는 12개의 CELL에 분산된 Q1, Q2, Q3, 및 양방향 전자석 전원장치가 연결되어 있다. 각각의 전원장치는 설정전류가 다르다. 이는 곧 SCR의 점호 각이 달음을 의미한다. 따라서 역률 보상용 콘덴서가 설치된 Q1, Q2, Q3의 TR6은 역률은 좋으나 전류고조파 특성이 나쁘며, 이 표에서 측정된 역률은 각각의 전원장치에 연결된 각기 다른 단상 부하로 인해서 각상의 역률이 일치하지 않음을 알 수 있다.

표 6. 출력 전류의 리플 특성

Table 6. Frequency spectrum(unipolar) of output current ripple

	Calculated resonance frequency Hz	Measured Freq Hz	Measured dB Vrms	rms (mA)	Input voltage (V)	DC current (A)
BH	9.65	9.812	-89.8	3.23	6.6225	662.25
Q1	12.5	12	-82.6	0.74	3.5432	35.432
Q2	12.5	11.188	-91.7	0.39	5.5562	83.343
Q3	12.5	11.562	-89.2	0.52	6.3828	95.7425
Q4	14.35	13.812	-85.2	5.5	3.3961	339.61
Q5	8.3	7.625	-89.1	3.5	4.1556	415.56
Q6	12.12	10.125	-70.1	31.26	1.86025	186.025
SF	14.5	13.25	-73.2	3.28	7.14	107.1

표 6은 단방향 전자석 전원장치에 포함된 저주파수의 전류 리플을 측정한 것을 나타낸 것으로 단방향 전자석 전원장치의 출력 전류에 포함된 고주파수의 전류 리플은 LC 필터를 통하여 쉽게 상쇄되어지나 저주파수의 전류 리플은 쉽게 상쇄되지 않기 때문에 단방향 전자석 전원장치의 저 주파수의 전류 리플의 양은 중요하다. 측정된 자료에 나타난 바로는 전원장치의 LC filter에 의한 공명 주파수(표 6의 Calculated resonance frequency)가 출력전류의 저 주파수 전류 리플에 그대로 반영되고 있음을 나타내고 있다. 현재 저장링에 저장된 전자빔의 성분에 저 주파수의 리플 성분이 포함되어 있는 것으로 파악되었다. 이러한 저 주파수의 리플 성분이 고주파 가속장치에 공급되는 저 전도수의 온도 변화에 의한 것으로 추정되고 있다. 그러나 단방향 전자석 전원장치에서 저 주파수의 전류 리플이 측정됨에 따라, 이러한 저 주파수가 전자빔에 영향을 미치는지의 여부는 현재까지 명확히 밝혀지지 않았으므로 계속 연구할 예정에 있다. 표 6에서 rms 값은 측정된 dB로부터 환산된 저 주파수 성분의 실효 전류 값이다. 그림 1은 Bending magnet 전원장치의 선형성을 측정한 결과로서 설정된 전류 값(I_{set})에 대한 출력전류의 오차 값(평균 DC 출력 전류 - 설정값 : $AVI_{magnet} - I_{set}$)을 나타낸 것이다. 포항가속기연구소의 저장링의 선형성의 사양은 $\pm 0.02\%$ 이나 실제 전원장치의 측정 결과는 이 허용범위를 초과하고 있다. 하지만 실제 저장링의 운전시 이러한 오차는 전자빔을 저장하는데 있어 영향을 주지 않았다. 이 오차는 두 가지 방법으로 보정할 수 있는데, 소프트웨어로 보정하는 방법과 하드웨어로 보정하는 방법이 있다. 현재 저장링에 설치된 모든 단방향 전원장치에는 이러한 보정 과정을 추후 실시할 예정이다. 표 7에 저장링에 설치되어 운전 중인 전자석 전원장치의 입력과 출력, 그리고 부하의 상태를 나타낸 것이다. 표 7에 나타난 측정 결과는 저장링이 설계로 운전 중에 각 전원장치마다 10시간 이상 측정을 수행하면서 얻어진 자료의 일부이다. 표 7에서 잘 나타나듯이, 전원장치의 전류 안정도는 요구 사양을 충분히 만족시키고 있다. 또한 입력 AC측 전압, 전류, 그리고 출력 DC측 전압도 상당한 안정도를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 전자석 전원 뿐만 아니라 가속기의 전체 환경이 안정되게 작동이 되고 있다는 것을 간접적으로 보여주는 것이다. 단방향 전원장치의 예로서 Q3 전자석 전원장치의 전류 안정도와 리플, 리플 스펙트럼을 측정한 것이 그

림 2, 3, 4이다. 양방향 전원장치의 예로서 CH3 전자석 전원장치의 전류 안정도와 리플, 리플 스펙트럼을 측정한 것이 그림 5, 6, 7에 보여진다. 그림 3과 6에서 잘 나타나듯이, 전류의 리플 성분도 요구 사양(Q3 : $\pm 0.05\%$, CH : $\pm 0.5\%$) 내에서 동적이 되고 있다는 것을 알 수 있다. 이때 측정한 스펙트럼(그림 4, 7)에서도 주 맥동 주파수가 잘 나타나고 있다. 여기에서 Q3인 경우는 LC필터에 의한 주파수이며, CH인 경우는 전원장치의 스위칭에 의한 주파수이다. 전류 안정도 그레프의 계산 결과치들은 표 7에 보여주었으며 그림 2와 5에 나타난 결과는 전체 측정 시간(약 1500분) 중 1/3시간에 걸쳐 그레프를 기록한 것을 보여 준다.

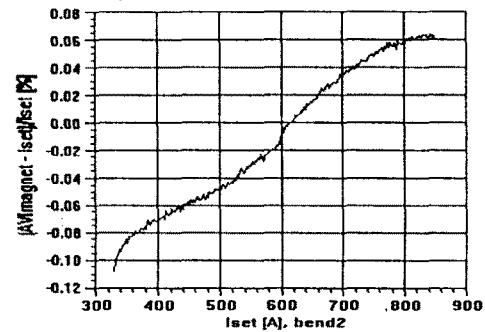


그림 1. Bending magnet 전원장치의 선형성

Figure 1. Linearity plot of Bending magnet power supply.

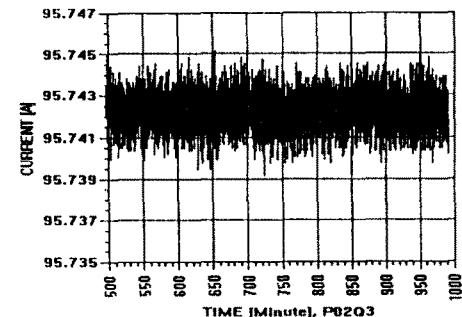


그림 2. Q3 전원장치의 전류안정도(20.9ppm/Div.)

Figure 2. Long term current stability of Q3

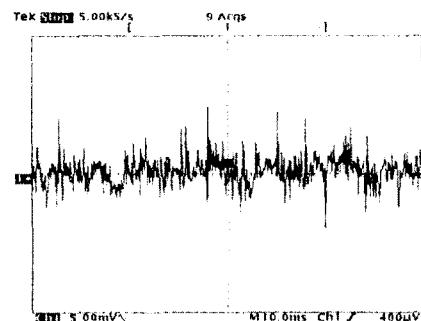


그림 3. Q3 전원장치의 전류 리플(95.7A 운전시)

Figure 3. Current ripple of Q3

표 5. 6.6 KV 전력선의 각 상에 대한 특성표

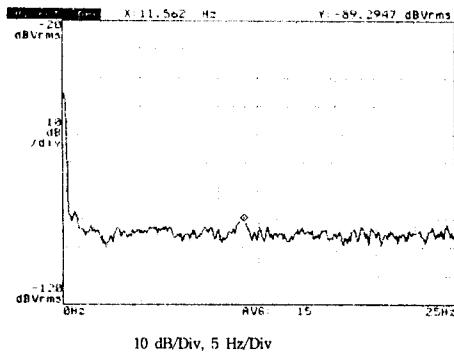
Table 5. Phase characteristics of 6.6 kV power line

		kV	A	kW	KVA	KVAR	PF	VTHD%	ATHD%
BEND	R	6.461	43.11	141.26	175.58	104.28	0.804	1.92	5.481
	S	6.612	39.59	100.95	168.03	134.33	0.6	1.778	5.931
	T	6.604	41.79	87.54	131.56	98.21	0.665	1.234	5.620
Q4	R	6.547	9.783	26.39	40.20	30.32	0.656	1.91	10.21
	S	6.707	8.805	16.598	37.28	33.38	0.445	1.581	10.39
	T	6.682	10.357	16.18	33.71	29.58	0.480	1.227	10.09
Q5	R	6.545	15.372	48.220	63.05	40.63	0.764	1.888	6.428
	S	6.709	13.864	33.65	58.55	47.92	0.574	1.573	6.663
	T	6.683	15.406	31.30	50.39	39.49	0.621	1.249	6.39
TR6	R	6.565	16.78	61.74	69.21	31.27	0.892	1.92	35.35
	S	6.727	16.282	56.61	69.1	39.65	0.818	1.561	69.9
	T	6.703	19.653	50.77	64.14	39.2	0.791	1.223	33.37
TR19	R	6.531	7.96	21.55	32.68	24.57	0.659	1.891	30.71
	S	6.693	6.581	13.586	27.77	24.22	0.489	1.644	26.3
	T	6.676	12.686	13.918	41.27	38.85	0.337	1.243	40.88
		Total	730.32 KW	1047.7 KVA	6746.46 KVAR				

표 7. 지장령 전자석전원장치 특성표 [unit : ppm]

Table 7. Measured characteristics of magnet power supply

	DC							AC	
	Current stability			Voltage variation		Load variation		Current variation	Voltage variation
	Peak	(±)rms	rms spec	p-p	(±)rms	p-p	(±)rms	(±)rms	(±)rms
BD	175.151	23.903	± 50	700.70	87.91	745.19	92.22	4084.73	5141.86
Q4	53.002	5.962	± 50	801.05	88.84	777.49	88.93	5374.82	5096.36
Q5	245.453	19.065	± 50	827.914	108.77	786.99	104.53	12267.28	7715.30
Q6	258.029	29.310	± 50	2961.22	231.40	2907.47	232.39	34551.3	12625.9
SF	123.250	13.300	± 500	2448.55	180.11	2468.14	180.69	75740.49	16921.14
Q1	197.564	24.306	± 50	1252.27	112.128	1254.387	112.668	28422.2	6165.35
Q2	80.990	9.392	± 50	691.008	89.222	699.66	91.828	20027.16	6991.68
Q3	90.8693	8.978	± 50	541.137	66.61	559.46	67.055	22019.65	5417.50
CH	513.97	72.912	± 500						6239.58
CV	55.352	10.45	± 500						5984.12



Input voltage : 6.3826 [V]

그림 4. Q3 전원장치의 전류 리플 스펙트럼

Figure 4. Current ripple spectrum of Q3

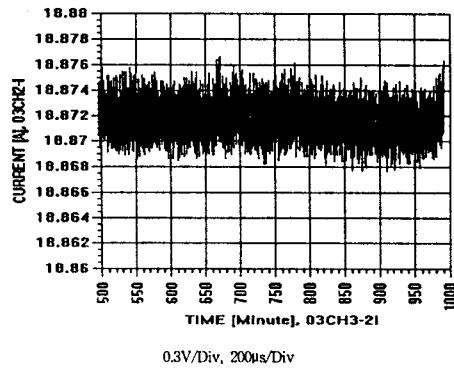


그림 5. CH2 전원장치의 전류안정도(106ppm/Div.)

Figure 5. Long term current stability of CH2.

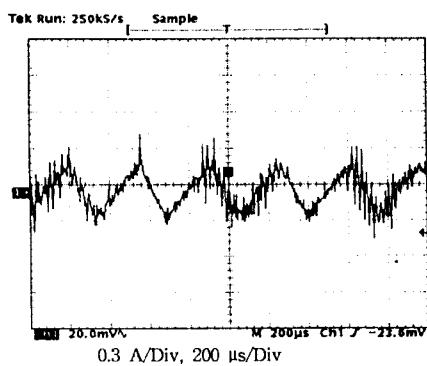
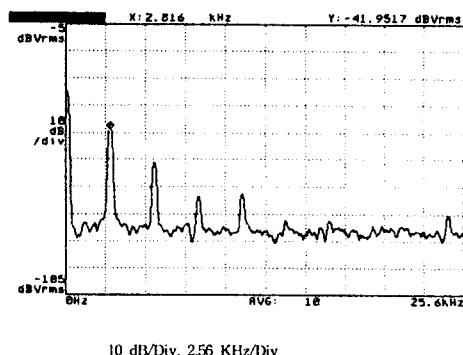


그림 6. CH2 전원장치의 전류 리플(18.87A 운전시)

Figure 6. Current ripple of CH2

현재 포항가속기연구소의 저장링은 0.01%단계로 전자빔의 에너지를 증가시켜 2.5 GeV의 전자빔에 도달하는 데 성공하였다. 2.0 GeV에서 2.5 GeV로 도달하는 데 걸린 시간은 약 15분 정도 소요되었다. 에너지 램핑(Ramping)을 하는 동안 저장링에 설치된 모든 전자석 전원장치는 이상이 없었다. 1997년부터 2.5 GeV의 에너지를 갖는 전자빔을 저장하는 상황에서도 장시간 운전이 가능하도록 계속적으로 전원장치의 안정도와 신뢰성을 관측할 예정이다



Input voltage : 1.2581 [V]

그림 7. CH2 전원장치의 전류 리플 스펙트럼

Figure 7. Current ripple spectrum of CH2

3. 결 론

본 논문에서는 포항방사광가속기연구소의 저장링에 설치되어 운전중인 여러 가지 높은 전류 안정도를 갖는 전자석 전원장치들의 성능을 측정한 결과와 운전 경험에 대해 기술하였다. 전자석 전원장치의 입력력과 출력, 그리고 부하의 상태를 장시간에 걸쳐 측정하여 모든 전자석 전원장치가 요구 사양을 충분히 만족한다는 결과를 얻었다. 다만 선형성에서는 아직 요구 사양을 만족하지 못했다. 추후 단계적으로 성능 향상을 통하여 요구 사양 내에 들어오도록 할 계획이다. 이 결과는 약 2년정도의 운전 기간을 거친 후 10 시간 이상 각각의 전원장치들에서 측정한 결과이다. 현재까지 발생하였던 고장들은 주로 통신상에 발생하는 노이즈가 대부분이었으며 제어회로의 전자기판의 불량으로 인한 고장이 가끔 발생했다. 이러한 전자기판의 불량으로 인한 고장은 지금까지의 운전을 통해 보완되었으며, 통신상에 발생하는 노이즈도 포항방사광가속기연구소의 저장링 시스템이 점차 안정되어 감에 따라 감소하는 경향을 보이고 있어 이로 인한 전자석 전원장치들의 고장도 점차 줄어들고 있다. 현재까지 저장링에 설치된 모든 전원장치를 운전하면서 심각한 문제가 발생하지 않고 성공적으로 임무를 수행하므로서 포항방사광가속기의 운전에 안정을 기하여, 전자빔을 사용하는 사용자에게 양질의 전자빔을 제공하고 있다.

참고문헌

- [1] 1995년도 포항가속기연구소 연차보고서.