

방사광 가속기용 2극 전자석 특성측정 및 보정

강봉구 · 박기현 · 윤종렬 · 구양모

포항가속기연구소

경북 포항시 효자동 산 31번지

(1992년 4월 15일 받음)

포항 방사광 가속기 저장링용 시제품 2극전자석의 특성측정 및 보정결과에 대하여 기술 하였다. 전자석의 자장특성 측정을 위해 Hall probe mapping 기법과 rotating coil 기법을 동시에 사용하였다. 자장측정 결과로부터 2극전자석의 요구조건을 만족하도록 자석의 양쪽 끝 부분을 수정하였다. 보정이 끝난 전자석은 2.0 GeV의 beam energy로 동작시킬 경우(1.058 Tesla) 약 99.7%의 효율을 얻었으며, 4극 이상의 다극 오차성분도 허용오차 범위 미만으로 포항 방사광 가속기 저장링용 2극 전자석으로 적합함이 판명 되었다.

I. 서 론

포항 방사광 가속기의 저장링용 2극 전자석의 시제품이 1991년 12월말 제작완료되어 1992년 1월부터 2월말까지 전자석 특성 및 보정 시험을 거쳤다. 제작된 시제품은 특성 보정이 용이하도록 4개의 pole-end를 장착 또는 제거할 수 있도록 설계 되었으며[1], 자기적인 특성은 포항 가속기 연구소에서 개발된 전자석 측정시스템을 사용하여 측정 하였다[2].

자장측정은 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 평면상에서 다극오차가 최소한이 되도록 설계된 자극(pole)의 형상이 자석의 길이방향(beam 진행방향)으로 적분된 자장의 다극오차와의 상관관계의 규명, 각각의 인가전류에 대한 자장변화 효율의 측정, 본제품 설계를 위한 최적의 pole-end 형상의 설정, 및 자장의 영향에 의한 전자석의 기계적인 변형의 측정 등을 위해 요구된다.

측정 방법으로는 가속기용 전자석 측정을 위해 널리 사용되는 방법인 Hall probe mapping법과 rotating coil법을 사용하였다[3]. Hall probe mapping법은 전자석의 core 특성측정 및 fringe field 측정을 위해 사용 되었으며, rotating coil은 전자석의 beam방향으로 적분된 자장의 2극 성분 및 다극오차 성분의 측정에 사용 되었다.

본 논문의 제2절에서는 PLS 저장링용 2극 전자석의 주요 parameter와 beam dynamics 요구조건으로부터

설정된 허용 다극오차 범위를 요약하였고, 제3절에서는 전자석 측정 및 보정결과에 대하여 기술하였다.

II. 저장링용 2극 전자석

포항 방사광 가속기 건설에는 36개의 저장링용 2극 전자석이 요구되며, 각각의 전자석은 beam energy가 2.5 GeV까지 동작 할 수 있도록 설계되어 있다(그림 1).

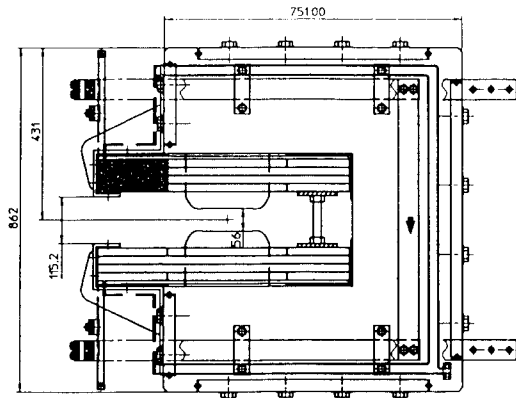


Fig. 1. A schematic diagram of the PLS Storage Ring dipole magnet.

Table I. Major parameter list of the PLS Storage Ring dipole magnet.

Descriptions	2.0 (2.5 GeV)	Trim Winding
Quantity of magnet [ea] (Product + Spare + Prototype)	36+2+1	
Magnetic flux density on orbit [T]	1.058(1.323)	0.0121
Effective magnetic length [m]	1.10	
Total magnet weight [kg]	5620	
Magnet gap on orbit [mm]	56	
Good field width [mm]	±30	
Good field height [mm]	±18	
Ampere-Turns($\eta=98\%$)	47840(59916)	543
Current [A]	659.44(832.17)	4.848
Voltage drop per magnet [V]	12.97(16.37)	3.514
Current density [A/mm ²]	3.059(3.86)	0.526
Power dissipation per magnet [kW]	8.554(13.621)	
Water circuits per magnet [ea]	2	
Water flow per magnet [liter/min]		
at 60 psi pressure drop	2.9	
at 90 psi pressure drop	3.55	
Water temperature rise [°C]		
at 60 psi pressure drop	21(34)	
at 90 psi pressure drop	17(28)	

포항공대, 산업과학기술연구소, 포항제철 공동으로 개발된 가속기 전자석 core 용 철판으로 제작된 core에는 4개의 코일이 감겨져 있으며, 2개의 main winding은 2극 자장형성에 사용되고 2개의 trim winding은 beam의 궤도수정용 자장 발생에 이용된다. 2개의 trim winding에 의한 자장은 main winding에 의해 여기되는 최대자장 세기의 1% 정도를 여기 시킬수 있도록 설계되어 있다. 전자석의 주요 parameter는 표 I에서 주어진 바와 같다.

전자석 제작에는 제작오차가 발생한다. 저장된 전자빔을 장시간 저장하기 위해서는 전자석의 제작오차를 최대한 줄여 주어야 한다. 2극 전자석의 경우 36개의 전자석이 동일한 전류로 여기되었을 경우 전자석의 빔 경로를 따라 적분된 2극 자장성분의 상대오차가 0.1% 미만인 되도록 제작 되어야 한다. 또한, core의 saturation 및 pole 면적이 유한함으로 인해 발생하는 다극오차 성분이 최소한이 되도록 설계, 제작 되어야 한다. Beam dynamics 요구조건으로 부터 추출된 2극 전자석의 최대허용 다극오차 성분은 표 II에 주어진 바와 같다.

자장측정은 표 I에서 주어진 전자석의 주요 parame-

ter에 대하여 제작된 전자석이 설계치를 허용 오차범위인 0.1% 미만에서 만족시키고 있는지를 확인하고, 가속기 동작시 전자빔의 제어에 필요한 인가 전류에 대한 여기자

Table II. Multipole error tolerance of the PLS Storage Ring dipole magnet.

		Systematic	Random
$n=2$	$B_2 L/B_1 L=$	1.25×10^{-4}	5.0×10^{-5}
$n=3$	$B_3 L/B_1 L=$	1.5×10^{-4}	3.0×10^{-4}
$n=4$	$B_4 L/B_1 L=$	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
$n=5$	$B_5 L/B_1 L=$	2.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
$n>5$		unspecified	
$r_0=3\text{cm}$	$B^{n+1} = \frac{1}{n!} \frac{d^n B}{dr^n} \cdot r_0^n$		

장의 변화(excitation curve)를 측정하며, 다극오차 성분을 측정하여 표 II에 주어진 허용치 미만의 오차를 포함하도록 전자석의 pole을 보정하여야 한다. 이를 위한 측

정 시스템은 빔 방향으로 적분된 2극 자장성분 및 인가 전류의 측정오차가 0.02% 미만이어야 하고, 다극오차성분 측정오차가 0.001% 미만이어야 한다. 또한, core의 상태 및 fringe field 측정을 위하여 pole사이의 전 공간에 있어서의 자장측정이 요구된다.

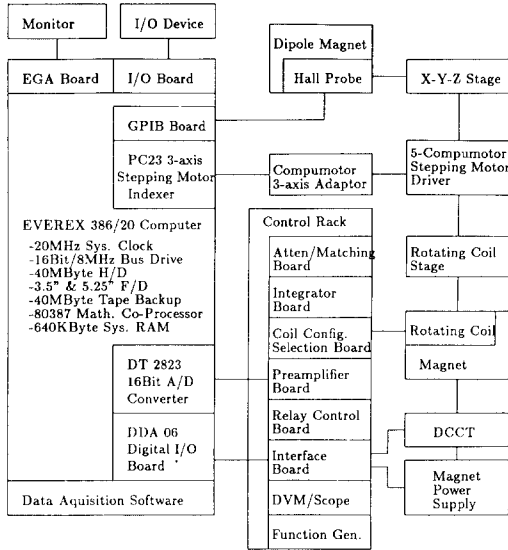


Fig. 2. Block diagram of the data acquisition system of PLS magnet measurement facility.

이러한 고정밀 자장측정을 위해 그림 2에서 주어진 2극 전자석용 rotating coil과 신호처리장치 및 고안정도 전류공급장치를 개발 하였으며[2], pole의 자장분포를 측정하기 위한 Hall probe X-Y-Z mapping stage가 설치되었다.

III. 측정결과

시제품 2극 전자석의 여기전류에 대한 자장의 전달특성을 측정하기 위해 Hall probe를 사용하여 pole의 중앙에서 자장을 측정하였다(그림 3). 인가전류 800 A(1.3 Tesla) 미만에서는 자장은 여기전류에 비교적 비례하여 증가하나, 그 이상의 여기전류에서는 core $B-H$ curve의 saturation영역에 해당되어 nonlinear 특성을 보이며, 1000 A(약 1.5 Tesla)여기시 효율이 약 7% 정도 감소한다.

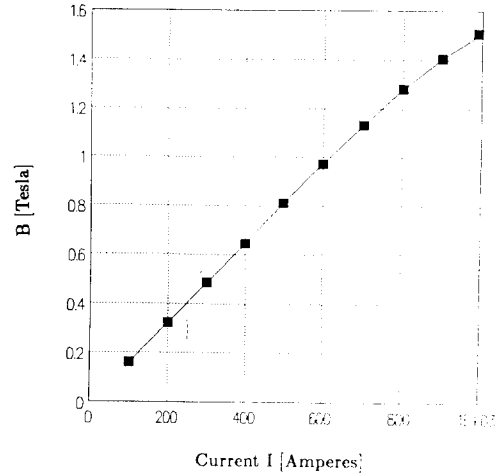


Fig. 3. Magnetic field versus excitation current for a PLS Storage Ring prototype dipole magnet.

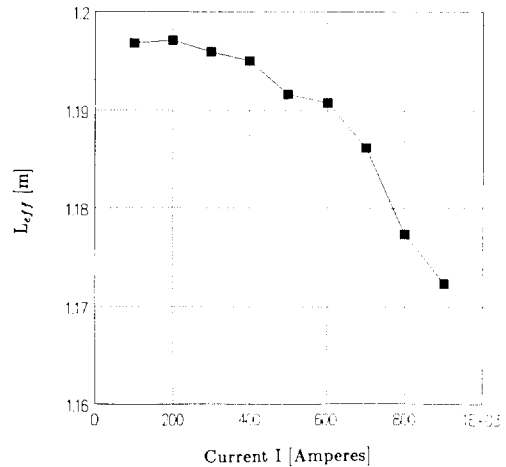


Fig. 4. Effective magnetic length versus excitation current.

그림 4는 전자석의 실효길이(effective length)를 측정하기 위하여 여기전류에 대한 빔 방향으로 적분된 자장의 전달특성을 측정하고, 측정값을 pole의 중앙에서 Hall probe로 측정한 자장으로 나누어준 결과이다. Effective length는 낮은 여기전류에서는 약 1.3 m 정도이나 여기전류가 증가함에 따라 전자석의 pole-end 부분의 saturation에 의한 영향때문에 effective length는 감소한다. Pole-end의 saturation효과를 감소시키기 위해 제거, 장

착이 가능하도록 설계된 pole-end의 끝부분을 pole면에 평행한 방향과 수직인 방향으로 각각 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 깊이가 되도록 보정을 하였다. Pole-end 보정후 rotating coil을

사용하여 측정된 그림 5에서 보여준 바와 같이 2 GeV beam energy에 해당되는 660 A 여기전류하에서 효율은 99.7% 정도이고, 2.5 GeV(830A)에서의 효율은 약 97.6%이어서 표 1에서 주어진 효율의 설계치 98%를 비교적 잘 만족 시켜주고 있다.

Pole-end 보정후 rotating coil을 사용하여 다극 오차를 측정하였다. 전류에 대한 4극 오차를 그림 6에 도시하였다. 4극 오차는 pole의 중심을 지나는 수직, 수평면에 대하여 전자석이 대칭을 유지 할 때에는 존재하지 않으나, 시제품 전자석과 같이 C형 2극 전자석에는 core를 따른 자장의 경로 차이에 의해 필연적으로 발생된다. Pole사이의 중심 평면에서 수직인 성분의 4극 자장성분을 normal성분이라 하고, 수평한 자장성분을 skew성분이라고 할때, skew성분은 상하 pole이 대칭이 유지되지 않으므로 발생된다. 그림 6에서 normal성분은 전류의 제곱에 비례하여 감소하고 skew성분은 전류에 비례함을 볼 수 있다. 이는, 인가전류의 증가에 따라 pole사이의 자장이 증가하고, pole사이에 작용하는 인력은 자장의 제곱에 비례하여 증가하므로, pole사이의 인력에 의해 core가 탄성 변형되어 pole사이의 자장의 경로 차이에 대한 영향이 전류의 제곱에 비례하기 때문이다. 따라서

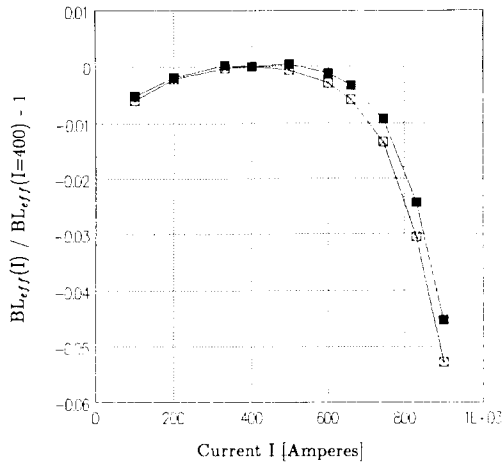


Fig. 5. Effects of end chamfering on fundamental ($N=1$) excitation.
 (□ : Unchamfered.
 ■ : $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ chamfered.)

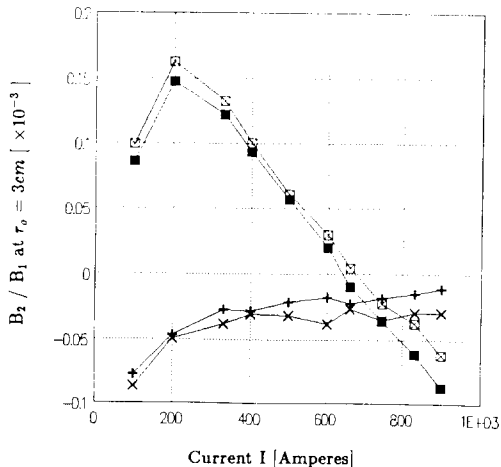


Fig. 6. Normalized quadrupole error versus current.
 (□ : Normal, unchamfered.
 ■ : Normal, $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ chamfered.
 + : Skew, unchamfered.
 × : Skew, $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ chamfered)

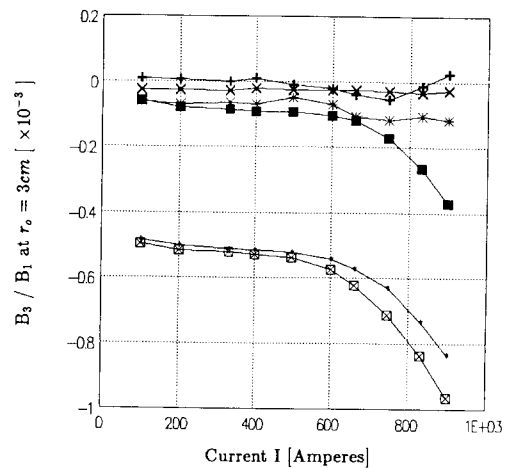


Fig. 7. Normalized sextupole error versus current.
 (□ : Normal, unchamfered.
 * : Normal, $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ chamfered.
 ■ : Normal, chamfered and shimmed.
 + : Skew, unchamfered.
 ※ : Skew, $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ chamfered.
 X : Skew, chamfered and shimmed)

4극 오차는 pole대칭성과 자장의 경로 차이에 의한 영향이 주된 원인이므로 pole-end saturation을 감소 시키기 위한 보정에는 영향을 비교적 받지 않는다.

그림 7은 전류에 대한 6극 오차성분을 도시한 것이다. 6극 오차의 주 원인은 pole면적의 유한함에 기인한다. 따라서, core saturation이나 pole-end saturation은 6극 오차에 직접적인 영향을 미친다. 낮은 여기전류 하에서 normal 6극 성분은 pole의 유한함에 의한 영향이고, 높은 여기 전류에서 normal 6극 성분이 증가하는 이유는 pole-end saturation 및 core saturation에 의한 영향 때문이다. Pole-end를 2cm×2cm로 보정한 경우 core가 saturation이 되기 전에 발생하는 pole-end saturation효과를 감소 시켰기 때문에 높은 여기전류에서 보정전보다 6극 오차는 감소한다. 그러나 2cm×2cm로 pole-end를 보정한 경우 normal 6극 오차는 2 GeV에서 6×10^{-4} , 그리고 2.5 GeV에서 8.3×10^{-4} 으로 표 II에서 주어진 전체 6극 오차 허용치 3.5×10^{-4} 을 만족시키지 못하고 있다.

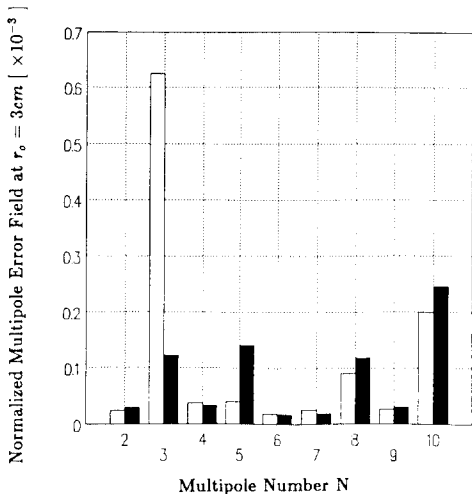


Fig. 8. Normalized multipole error versus multipole number at 2 GeV excitation.

(□ : Unchamfered.

■ : Chamfered and shimmed)

이를 보정하기 위해 pole-end의 양쪽 끝부분을 중앙에서 5 cm 떨어진 지점부터 3.5 mm 높여 주었다. 이러한 보정이 필요한 이유는 core가 saturation되기 전 설계된 pole의 단면이 최대한 6극 성분을 제거하고 균일한 자장을 유지하도록 설계되었으나 pole-end 부분에서는 fringe field만 존재하므로 이러한 6극 성분 보상효과가 없어짐으로, pole-end 부분에 fringe field에 의해 발생하는 6극 오차성분을 보정시켜줄 6극성분의 전자석 구조가 필요하기 때문이다. 보정후의 전자석은 2.0 GeV에서 1.2×10^{-4} 그리고 2.5 GeV에서 2.6×10^{-4} 으로 허용 오차기준을 충분히 만족 시키고 있다.

앞서와 같이 보정된 전자석에 대해 각각의 다극 오차성분을 그림 8에 도시 하였다. 관찰할 수 있는 바와같이 보정된 전자석은 전 다극 오차성분에 대해 beam dynamics의 최대 허용기준 표 II를 만족 시켜주고 있다.

IV. 결 론

포항 방사광 가속기 저장링용 시제품 2극 전자석에 대한 특성측정 및 보정결과 시제품은 설계에 따라 적절하게 제작 되었으며, 본제품은 pole-end 끝부분으로 부터 pole에 수직 수평한 면으로 각각 2cm×2cm 경사를 가지게 하고, pole의 중앙에서 5 cm 지점 떨어진 지점부터 경사면을 3.2 mm 높여 주도록 제작될 경우 저장링용 2극 전자석의 모든 요구 조건을 만족 시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 구양모, 나영균, 한홍식, 제5회 응용물리학 심포지움, 자성재료 및 응용, 279(1990).
- [2] B.K. Kang and Y.M. Koo, Pohang Light Source Engineering Note NM044, (1991).
- [3] B.K. Kang, K.H. Park, and J.R. Yoon, Pohang Light Source Engineering Note MN047, (1991).

Magnetic Measurement of PLS Storage Ring Prototype Dipole Magnet

B.K. Kang, K.H. Park, J.R. Yoon, and Y.M. Koo

Pohang Accelerator Laboratory P. O. Box 125, Pohang, Kyungpook, Korea

(Received 15 April 1992)

Results of magnetic measurement of a prototype Storage Ring dipole magnet for the Pohang Light Source (PLS) are summarized. Hall probe mapping and rotating coil methods are used to measure field profiles and integrated field properties. End chamfering experiments are performed on the as-built magnet, which has four removable pole-end pieces, to meet the specifications set from beam dynamics requirement. The corrected magnet has efficiency of 99.7% at 2.0 GeV excitation and higher order multipole error levels less than the specifications for all excitations, showing that the magnet has appropriate properties for the PLS Storage Ring.