

Pohang Light Source(PLS)용 전자석의 설계, 제작 및 측정¹⁾

김동연 · John Milburn · 강봉구 · 구양모

포항 공과 대학교 가속기 연구소

경상북도 포항시 효자동 산 31번지

(1995년 12월 1일 받음, 1995년 12월 7일 최종수정본 받음)

I. 머리 말

국내 최초의 대형 가속기 시설인 포항방사광 가속기 (Pohang Light Source)가 1995년 9월을 기점으로 일반 User 들을 위하여 방사광을 제공하기 시작하였다. 포항방사광 가속기는[1] 전자를 2.0GeV 까지 가속시키는 선형 가속기와 가속된 전자를 원형 궤도에 저장하는 전자 저장링, 전자가 방출하는 방사광을 실험 지역까지 끌어내는 빔라인으로 이루어져 있다. PLS는 입자들을 충돌시켜 그 구성 물질을 찾아내는 Collider가 아니라 전자에서 방출되는 빛을 사용하기 위한 광원(Light Source)이다. 이미 전세계적으로 운전 중인 Light Source가 여러개 있지만 PLS는 방사광의 활용만을 목적으로 설계 제작되었다. 따라서 기존의 광원보다 낮은 Beam Emittance를 가지고 있고 삼입 장치를 설치할 수 있는 직선 구간을 많이 보유하고 있다는 면에서 기존의 광원과는 구별하여 3세대 광원이라고 부른다.

제3세대 방사광 가속기에 사용되는 전자석은 전자가 저장링을 수백억번 이상을 회전할 동안 안정된 전자 궤도를 보장하여야 하므로 전자석들끼리의 Fundamental 성분의 에러 및 한 전자석에서 허용되는 다극 에러가 아주 작아야 한다. 또 허용되는 에러들이 작기 때문에 그것들을 분간하기 위한 자장 측정 장치 또는 매우 정밀하여야 한다. 이 보고서에서는 이런 Tolerance를 만족시키기 위한 전자석의 설계, 제작, 측정에 대하여 설명하였다.

1. 전자석의 역할

PLS의 전자 저장링은 전자빔의 궤도 길이가 280.56m이다. PLS의 전자 저장링은 같은 구조를 가지는 1Cell의 12번 반복으로 이루어져 있다. 1Cell의 개략적인 구조가 Fig. 1에 나타나 있다. 각 전자석의 역할을 간략히 설명하면 다음과 같다.

1) 2극 전자석

전자의 진행 방향에 수직인 방향으로 자장을 발생시키

는 장치로써 Lorentz 힘에 의하여 입자의 진행 방향을 바꾸는 작용을 하며 편향 전자석이라고도 한다. PLS의 저장링은 36개의 2극 전자석을 사용하여 전자들이 하나의 자석을 통과할 때마다 10도씩 휘어져 모두 360도 회전하게 설계되었다. 전자들은 2극 전자석에 의해 진행 방향이 변화함에 따라 방사광을 발생시킨다.

2) 4극 전자석

4극 전자석은 전자의 진행 방향에 수직인 평면상에 자극들이 4-fold 회전 대칭을 이루며 N극과 S극이 번갈아 놓인 형상을 하고, 저궤는 자석의 중심에서 직선적인 기울기로 분포된다. 즉, 4극 자석의 중심에서 자장의 세기는 0이며 중심에서 멀어질수록 거리에 비례하여 자장의 세기가 강해져, 정궤도에서 벗어나 진행되는 전자는 이 자장의 기울기에 의해 중심 방향 혹은 중심에서 반대 방향으로 힘을 받게 된다. 이는 광학에서 볼록렌즈나 오목렌즈가 빛을 focusing 하거나 defocusing 하는 것과 같은 역할을 하게 된다. 따라서 이와 같은 전자석의 기능을 이용하여 여러개의 2극과 4극전자석을 잘 배열하여 전자들을 제어하면 전자들이 분산되어 없어지지 않고 저장링에서 계속 원운동을 할 수 있다. PLS에서는 cell 당 12개의 4극전자석을 사용한다.

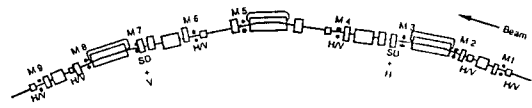


Fig 1. 전자저장링에서 한 Cell의 개략도

3) 6극 전자석

궤도의 바깥과 안쪽에서 회전하는 전자의 운동량은 서로 다르므로 입자들이 자장에 의해 받는 힘은 각각 다른

값을 갖게 된다. 이 때문에 전자들이 2극 및 4극 전자석을 지날 때 서로 분산하게 되는데 이것을 Chromacity라고 하고 6극 전자석은 이러한 Chromacity를 줄이기 위하여 사용된다. 그리고 6극 전자석은 여섯 개의 자극에 설치된 보조 코일을 사용하여 본래의 6극 성분 이외에 보정을 위한 수평 자장, 수직 자장 및 스큐(skew) 4극의 자장 성분을 야기시킬 수 있다. PLS 저장링에는 이와 같은 6극 전자석이 Cell 당 4개가 사용된다.

4) 보정전자석

보정전자석은 전자가 진행되는 방향과 수직인 면에 수평 또는 수직 방향으로 수백 Gauss의 약한 편향 자장을 발생시켜 2극 및 4극전자석으로 불완전하게 제어된 전자의 궤도를 수정하는데 사용된다. PLS에서 사용되는 보정전자석들을 전자의 수평 운동 및 수직 운동을 동시에 보정하는 복합형 보정전자석이고 Cell 당 6개의 보정전자석이 사용되었다.

5) 삽입장치

삽입장치(Insertion Device)는 전자 저장링의 직선 구간에 설치하여 2극 전자석에서 발생하는 빛보다 밝고, 높은 에너지를 가지는 빛을 발생시키는 장치이다. 제3세대 방사광 가속기의 장점은 이와 같은 삽입장치의 설치를 염두에 두고 설계, 제작되었다는 점이다. 삽입장치는 구조적으로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 작은 2극 전자석들이 자장의 방향을 달리하면서 비입 방향으로 연속적으로 배치한 구조를 가진다. PLS에서는 주기가 7cm이고 길이가 약 3m인 Hybrid형 [2] Undulator U7을 제작하고 있다.

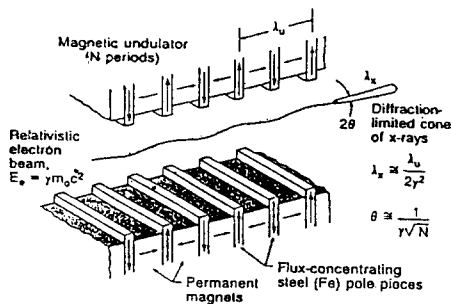


Fig 2. 삽입장치(Undulator)의 개략도

II. PLS 전자석의 설계 및 제작

전자석의 물리 설계에는 미국의 LBL(Lawrence Ber-

keley Laboratory)에서 개발된 2차원 Magnetostatic Code인 POISSON Group Code를 사용하였다. POISSON Group Code는 가속기 전자석의 설계에는 표준적인 Code로 통하여 자극 선단의 모양을 최적화 하여 줄 수 있다. POISSON Code는 2차원이라는 한계를 가지고 있기 때문에 이를 보완하기 위하여 Vector Field 사의 3차원 Magnetostatic Code TOSCA를 자장 측정과 연관시켜 사용하였다.

전자석의 길이 방향이 충분히 길어서 길이 방향의 자장 변화를 무시할 수 있을 때의 자장 표현은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\vec{B} = \vec{B}(x, y) = B_x(x, y) \hat{x} + B_y(x, y) \hat{y}$$

또, Scalar Potential V, 와 Vector Potential A를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, B_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad \text{또는,} \quad B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$$

여기서 다음과 같은 Complex Vector Potential F를 도입할 수 있다.

$$F(x, y) = A(x, y) + iV(x, y) = F(z), \quad \text{여기서 } z = x + iy.$$

F가 해석 함수이므로 다음과 같이 Taylor 급수로 쓸 수 있다.

$$F(z) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \left(\frac{z}{r_0}\right)^k = C_1 \left(\frac{z}{r_0}\right) + C_2 \left(\frac{z}{r_0}\right)^2 + C_3 \left(\frac{z}{r_0}\right)^3 + \dots$$

여기서, r_0 는 C_k 의 차원을 Tesla-m로 만들기 위한 normalization radius이다. 이 F로부터 B_x 와 B_y 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B^* = B_x - iB_y = i \frac{dF}{dz} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k C_k}{r_0} \left(\frac{z}{r_0}\right)^{k-1}$$

$$= \frac{C_1}{r_0} \left(\frac{z}{r_0}\right) + \frac{2C_2}{r_0} \left(\frac{z}{r_0}\right)^1 + \frac{3C_3}{r_0} \left(\frac{z}{r_0}\right)^2 + \frac{4C_4}{r_0} \left(\frac{z}{r_0}\right)^3 + \dots$$

각 항들은 각각, 2극성분, 4극성분, 6극성분임을 쉽게 알 수 있다. 이상적인 전자석은 필요한 Fundamental 항만 존재하는 경우인데, 실제로는 재료의 불 균일성, 기계 가공의 정밀도의 한계, 자 속의 포화, 제한된 자극선단 등

으로 인하여 필요한 성분만 가지는 전자석을 만드는 것은 불가능하다. 필요한 Fundamental 항 이외의 항들은 전자석의 다극 에러라고 부르며 가능한 작게 설계되어야 한다. PLS의 저장링에서 허용하는 각 전자석의 오차 범위는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} 2\text{극전자석} : |\Delta B/B_0| &\leq 1 \times 10^{-3} \\ 4\text{극전자석} : |\Delta G/G_0| &\leq 1 \times 10^{-3} \\ 6\text{극전자석} : |\Delta K/K_0| &\leq 1 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

여기에서 $G = B'$ 이고, $K = B''$ 을 나타낸다. 전자석의 설계에는 자장의 질뿐만 아니라, 재료의 가격, 전기료, 전원의 가격, 냉각 문제 등을 고려하여 최소한의 경비로 주어진 조건을 만족하는 전자석을 설계하는 것이 필요하다. 가속기에 사용된 전자석의 제작절차는 전자석 사이에 많이 다르지 않다. 전자석은 철심과 코일 두 부분으로 이루어져 있다. 전형적인 철심과 코일의 제작 절차를 소개하면 아래와 같다.

1. 철 심

철심 재료는 자기유도에 의한 자속의 포화도가 1.85 Tesla 이상이고 보자력이 1.14 Oe 이하의 자기적 특성을 가지고 두께가 1mm인 냉연전기강판이 사용되었다. 전기 강판을 Blanking 하고 적층을하여 원하는 크기의 철심을 만든는데, 허용 범위의 균일한 자장을 얻기 위해서는 자극 선단의 윤곽 공차가 $28\mu\text{m}$ 이내여 유지되어야 한다. 이를 위해서 먼저 die set를 제작한 후 철판을 blanking하여 초폼부터 약 20매까지 3차원 치수 측정기를 전수 검사를 한다. 이 과정에서 측정 결과가 치수 공차를 벗어나면 die set를 수정하고, 치수 공차 이내이면 생산을 계속하면서 적층판 250매당 최종 1매에 대하여 치수 검사를 한다. 검사 시에는 반드시 공정을 중단하고 판정 결과를 기다려야 한다. 생산된 철판을 적층하여 철심을 만들 때 누적 공차를 최소화하여 균일한 자기적 특성을 주기 위해 blanking 된 철판을 생산순서에 따라 sorting하여 모든 철심들이 균일한 자기적, 기계적 특성을 가지도록 하였다. Blanking 한 철판을 적층할 때 철심이 원하는 공차 내에 들기 위해서는 적층시 철판의 윤곽면을 따라 아주 정밀한 공차를 유지해야 한다. 적층은 화강암 정반 위에 치수 편차가 철판의 치수 공차의 20% 이내인 적층치공구를 설치하여야 한다. 적층치공구는 철로 만들어진 두 개의 두꺼운 End Plate와 이들 사이에 평행한 철봉을 설치하여 End Plate가 적층방향으로 자유롭게 움직일 수 있도록 만들어졌다. End Plate에는 유압

장치가 부착되어 적층시 적층판에 약 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력이 가해질 수 있도록 하였다. 그리고 End Plate 사이에 적층된 적층판이 적층후 움직이지 못하도록 적층전에 적층판사이에 에폭시를 발라 적층하며, 적층후 볼트와 너트로 고정시킨 다음 오븐(Oven)에서 Curing을 거쳐 철심을 제작하였다.

2. 코 일

전자석에 전류를 흘려 자장을 발생시키는 코일 pancake은 도체 중앙에 냉각수가 흐를 수 있는 냉각공을 가지고 있는 Hollow Conductor를 사용한다. 도체를 감음치공구(Winding Fixture)에서 형상을 만든 후 에폭시로 성형(Molding)하고 오븐에서 고정하여 만든다. 동선은 Polyester tape와 Dacron tape로 절연하고, 감음 고정구에서 감은 다음 fiberglass로 전체를 감아 3중으로 절연한다. 코일의 품질을 관리하기 위하여 여러 기계적, 전기적 시험을 거쳐야 하며, 이들 시험에는 ASTM B 188-84b에 명시된 내역뿐만 아니라 Leak Test, Ball test, Impulse test, High voltage Test, water flow test 등이 포함된다.

위와 같이 만든 철심과 코일 Pancake을 결합한 후 전기회로와 냉각 회로에 연결시켜서 하나의 전자석이 만들어지며 이 과정을 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다.

III. 자장측정 [3]

1. 전자석의 자장측정

제작된 자장측정은 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) Probe로 보정된 Hall probe와 Rotating Coil을 사용하여 측정되었다. Hall probe Scan은 자속밀도의 분포를 측정하기 위하여 사용되었으며, 대부분의 전자석은 Rotating Coil을 사용하여 측정되었다. Rotating Coil은 절대값을 정확히 알기 위해서는 보정이 필요하며, Profile에 대한 정보가 없이 적분된 자장특성만을 측정할 수 있고, 측정온도에 예민한 단점이 있는 반면에, 짧은 시간내에 전자석의 Fundamental 성분과 다극 에러를 측정할 수 있는 큰 장점이 있어서 시제품과 본제품의 측정에 사용되었다.

Rotating Coil은 두 개의 Coil로 이루어져있는데, Fundamental을 측정할 때에는 바깥쪽 Coil만 사용하고 다극 에러를 측정할 때에는 바깥쪽과 안쪽의 Coil을 모두 사용한다. 바깥쪽과 안쪽의 Coil을 동시에 사용함으로써 신호가 큰 Fundamental 성분을 상쇄시킬 수 있고 상대적으로 신호가 작은 에러성분의 Sensitivity를 높힐 수

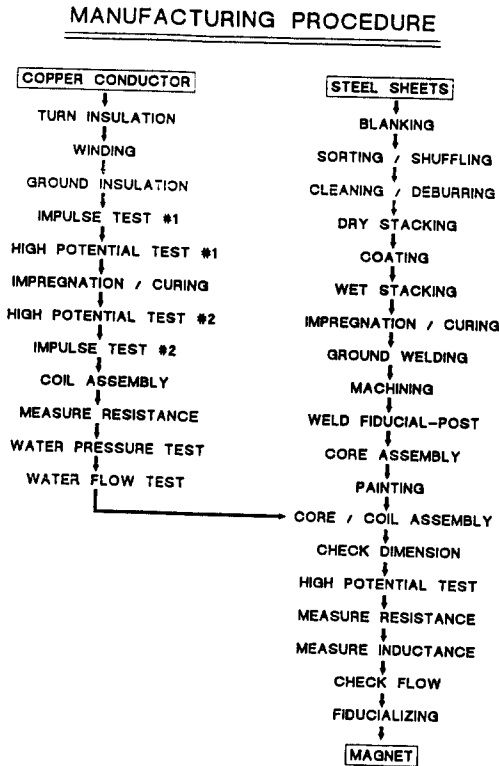


Fig. 3 전자석 제작과정의 Flow Chart.

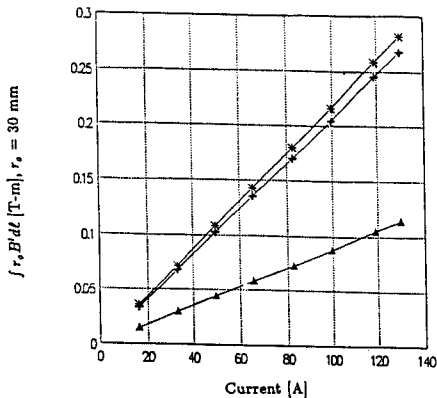


Fig. 4 여자 전류에 따른 4극 전자석의 Fundamental 성분의 변화 ▲: Chamfering 된 Q1, +: Chamfering 된 Q2, *: Chamfering 하지않은 Q2.

있었다. 전자석의 측정은 여자전류에 따른 Fundamental와 다극 Error의 변화를 측정한다. Fig. 4에는 여자전류에 따른 4극 전자석의 Fundamental을 나타내었고, Fig. 5에는 PLS 사극전자석의 다극 에러를 나타내었다. 자장

측정결과 전자저장링에 사용되는 전자석들은 모두 Magnet to Magnet 허용 Error 1×10^{-3} 을 만족하였다. 측정이 끝난 전자석들은 전자석들의 기계적 중심으로부터 Alignment를 위한 Fiducial의 좌표를 측정하는 3차원 CMM (Coordinate Measurement Machine) 측정을 거쳐 전자저장링에 설치되었다.

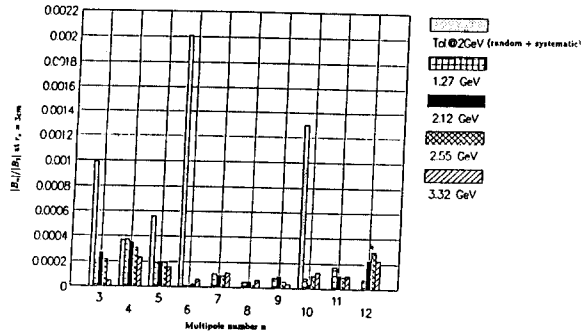


Fig. 5 4극 전자석의 다극 Error. Chamering 된 Q2의 경우.

2. 삽입장치의 자장측정

PLS에서 제작하고 있는 Hybrid형 Undulator의 핵심소재는 Pole을 여자시키는 영구자석이다. U7의 경우 35mm×35mm×23mm의 NdFeB Block을 약 1600여 개 사용하고 있다. Undulator에 사용되는 영구자석의 요구조건은 기계적으로 정밀해야하는 것 이외에 Magnetization과 보자력이 커야하며 Easy axis의 에러가 작아야 한다. 또 Block과 Block끼리의 착자정도가 균일하여야 한다.

Undulator의 자장측정은 2가지로 대별되는데, 첫째는 Undulator에 사용되는 NdFeB Block의 자기적성격을 정확히 파악하는 Block 측정이고 둘째는 최종 조립된 Undulator의 자속밀도 분포를 측정하는 것이다. NdFeB Block의 측정은 Helmholtz Coil System을 사용하였다. Helmholtz Coil을 사용한 Block의 측정은 $\sim 10^{-4}$ 정도의 분해능을 가짐을 알 수 있었다. Block의 측정에 있어서 오차의 주요인은 Magnetization의 온도의존성이었으며 전 측정과정에서 측정실의 온도를 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. U7에 사용된 NdFeB Block 측정결과와 일부가 Fig. 6에 나타나 있다. 가로축은 Serial Number이고 세로축은 $\mu_0 M_z$ (in Gauss)를 나타낸다. Easy axis 방향의 오차는 $\pm 3.4^\circ$ 의 요구조건을 모두 만족하고 있었고 Block과 Block의 Magnetization의 변화는 요구된 사양 2%를 약간 상회하고 있음을 알 수 있었다. U7에서는

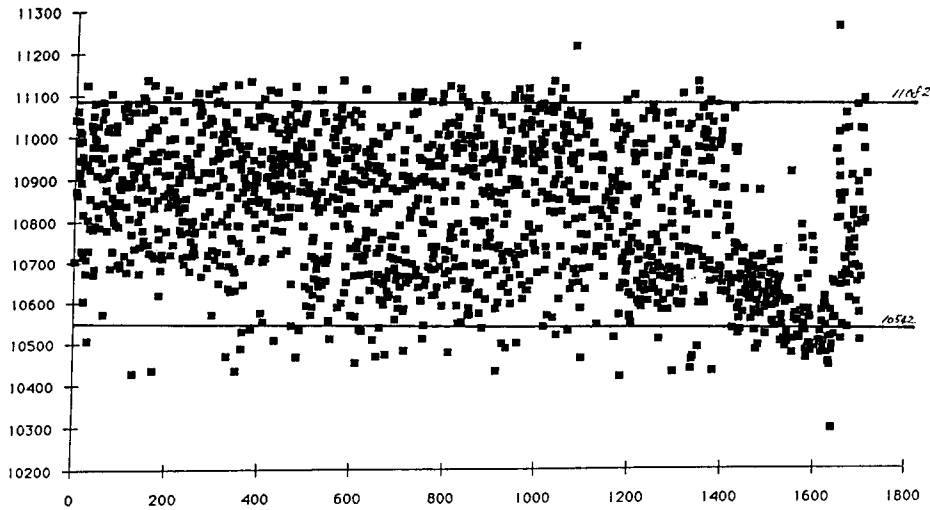


Fig. 6 NdFeB Block의 Magnetization 측정결과. 가로축은 Serial Number, 세로축은 $\mu_0 M_z$ (in Gauss).

6개의 Block 이 한 set를 이루어 양쪽의 Pole을 여자시키는데 이 6개 Block의 조합을 Sorting을 통하여 최적화함으로써 6개 Block set 평균의 편차를 0.03% 이내로 줄일 수 있었다.

있다. PLS의 전자석들을 설계, 제작, 측정하면서 정밀전자석의 최적 설계 기술, Engineering 기술, 제작, 기술, 정밀 자장 측정 기술 등을 축적할 수 있었다.

IV. 맺는말

PLS에 사용되는 전자석을 설계, 제작, 측정하였다. 최종으로 조립된 전자석의 정밀 자장 측정을 통하여 제작된 전자석들이 Beam Dynamics에서 요구하였던 모든 Magnet to Magnet 에러 및 Multipole(다극) 에러를 충분히 만족시킬 수 있었다. 전자석들은 전자 저장링에 설치되어 기대하였던 모든 기능을 성공적으로 수행하고

참고문헌

- [1] Conceptual Design Report of PLS, POSTECH, Pohang Korea (1992).
- [2] Halbach K., J. Physics(Paris) 44, C1-211 (1983).
- [3] B. K. Kang et. al. PLS Engineering Note # MN044(1991).