

# 포항방사광가속기용 중심자장7.5T 초전도위글러 개발

배 동진\*, 손 영욱+, 윤 영덕+, 김 동언+, 서 형석+  
\* 현대중공업(주) 중앙연구소 + 포항 방사광가속기 연구소

Development of 7.5T Superconducting Wiggler for Pohang Light Source

D.J. Bae\*, Y. U. Sohn+, Y. D. Yoon+, D. E. Kim+, H. S. Seo+

\* Hyundai Heavy Industries, R&D Center

+ Pohang Light Source Institute

## 1. 서 론

포항 방사광가속기는 크게 전자를 광속에 가깝게 가속시키는 선형가속기와 가속된 전자가 원운동할 수 있도록 전자를 저장하는 저장링, 전자파의 강도와 휘도를 증가시키는 삽입장치 및 발생된 방사광을 모직하는 곳까지 유도하는 빔라인 등으로 구성되어 있다.

특히 제 3 세대 방사광가속기의 특징인 삽입장치를 저장링의 직선부분에 설치하여 곡선부(Bending Magnet)에서 발생되는 방사광보다 더 높은 밀도의 복사선 또는 에너지를 얻을 수 있는데, 여기서 기술하는 위글러(Wiggler)는 저장링에서 궤도를 따라 회전하는 전자의 진행방향에 대한 전체 각이탈율(Net Angular Deflection)과 변이(Displacement)를 극소화시켜 방사광의 휘도를 향상시키고 빛의 파장영역을 확장시키는 역할을 한다.

따라서, 이 장치를 설치함으로써 제2세대 광원으로는 그 활용범위가 제한되어 있는 물질의 구조분석, 금속 및 용접 물질의 물성 연구, 화학반응의 정밀, 초미량분석 등 빛을 이용하는 전 분야에 이용범위가 확대되어 방사광가속기의 이용률을 극대화할 수 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 초전도 위글러(Wiggler)의 개요

포항방사광 가속기(PLS) 초전도 위글러를 구성하는 주요 부분과 기본적인 개념을 잠시 살펴보자. 초전도 위글러의 기본골격은 전자빔(e-beam)의 진행방향으로 3개의 평행한 초전도 dipole이 놓여 있는 것으로 볼 수 있다.

이 초전도 위글러의 전자 진행방향에서 수직으로 본 단면이 그림1에 나타나 있다. 중앙의 극은 길이가 짧고 자속 밀도가 크며 2개의 보조극은 길이가 길며 낮은 자속 밀도를 가지고 있다. 모든 코일은 NbTi 초전도선재로 이루어져 있다. 또 모든 코일은 레이스트랙(racetrack) 형상으로 권

선 되어 있다. 중앙부분의 코일은 두 부분으로 이루어져서 높은 자속 밀도 지역에 있는 코일은 낮은 전류 밀도로 동작하게 되며 상대적으로 낮은 자속 밀도에 위치한 코일은 높은 전류 밀도로 동작한다.

이것이 전자석부분이고, 이를 극저온으로 냉각시키기 위한 액체헬륨용기(Helium vessel)와 열침투를 줄이기 위한 질소스크린(Nitrogen Shield), 전류를 공급하기 위한 전류입력부(Current leads)등으로 구성된 극저온진공용기(cryostat)를 이룬다.

본 연구에서는 위글러를 구성하는 요소 중 초전도 2극 전자석 설계 및 제작, 전원공급장치 및 제어시스템 설계, 진공챔버(Vacuum Chamber) 및 극저온 용기의 설계 및 제작 등에 대하여 다루고자 한다.

### 2.2 초전도전자석 설계

초전도 전자석에서의 전자석의 목적은 주어진 특성을 가진 초전도 선재를 사용하여 우리의 관심지역에서의 최대의 자속밀도와 자장균일성을 내도록 초전도 코일의 형상이나 동작 전류 밀도 등을 결정하는 것이다.

최종적인 주극의 초전도 코일 형상이 그림 1에 나타나 있다. 여기서 초전도 코일은 2개로 이루어져 있다. 그 위치는 위글러중심에서 최대 자속밀도를 줄 수 있도록 대각선상에 위치하여야 한다. 또, 각각의 코일은 2개의 부분으로 이루어져 있어 서로 다른 전류밀도로 동작하게 된다. 자속 밀도가 큰 위치에 있는 코일은 낮은 전류밀도로, 자속 밀도가 낮은 위치에 있는 코일은 높은 전류밀도로 동작한다.

최적의 코일 배치를 찾아내기 위하여는 2차원 유한요소법을 사용하여 코일 위치, 전류밀도값, 철심위치 등을 변화시키면서 다음과 같은 양들을 관찰한다.

- 위글러의 중심자장( $B_0$ ).
- 낮은 전류밀도로 동작하는 코일의 최대 자속밀도( $B_{max1}$ ).
- 높은 전류밀도로 동작하는 코일의 최대 자속밀도( $B_{max2}$ ).

### 2.3 기계설계와 전기적 설계

그림 1에서 보는 것과 같이 1개의 주극과 2개의 보조극으로 구성되어 있는데 각 코일들은 soft iron pole에 감겨져 있고 이 저탄소강은 helium 온도(4.2°K)에서도 자기적 기계적 특성이 크게 변하지 않고 상온에서의 특징은 거의 그대로 보존된다. SC 전자석의 구조를 보면 일반 전자석과 마찬가지로 전자석의 중심에서 자장을 증폭하고 균일하게 분포할 수 있도록 iron pole과 iron yoke를 이용하는데 SC 전자석의 특성상 각 wire의 극소의 움직임도 허용될 수 없기 때문에 전자석 설계시 전자석구성품의 소재선택에 신중을 기하여야 하며 특히 상온에서 액체헬륨온도까지의 범위에서 열수축이 거의 없어야 한다.

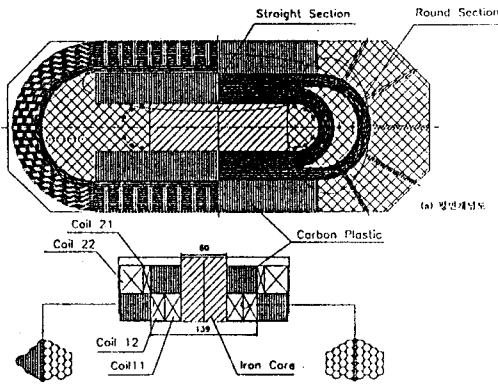


그림 1 초전도전자석

### 2.4 극저온 냉각 시스템

초전도 위글러는 초전도 전자석, 극저온용기 그리고 진공 챔버로 구성되어 있고, 그 보조장비인 전원공급장치(DC)와 액체 헬륨 공급장치로 이루어져 있다(그림2).

극저온용기(cryostat)는 그림 2와 같이 구성되어 있는데 전자석 중심의 warm bore로 진공챔버가 통과하게 된다. 전자석을 지지하고 있는 지지바는 극저온용기 외부에서 전자석의 위치를 미세 조정할 수 있게 외부로 나와 있으며 소재는 냉각에 따른 팽창/수축에 의한 전자석 위치 변화를 최소화하고 외부로부터 열전달을 줄여야 하는데 이 두조건을 모두 만족할 수 있는 지지봉(Fe-Ni 합금)을 선택하였다. 극저온용기의 내부 헬륨용기와 외부 용기 사이에 진공이 유지되어 있어 (~10<sup>6</sup> torr) 공기대류에 의한 열전달은 거의 없고 복사에 의한 열전달이 지배하게 되는데, 이를 효과적으로 차단하기 위해서 구리판으로 된 질소스크린을 삽입하였는데 극저온용기 상부에 설치된 질소탱크에서 질소스크린 주위로 액체질소가 순환하게 설계되어 있다. 또 진공챔버 주위에 역시 질소스크린을 설치하였다.

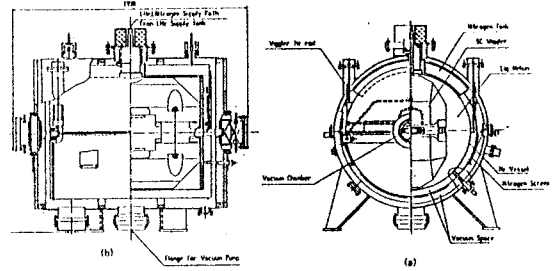


그림2 극저온냉각 시스템

### 2.5 초전도 코일

레이스트랙형의 시작품을 제작하여 시험한 결과 제작상 노출된 여러 가지의 문제점들로 인하여 매우 낮은 자기장에서 첫번째 퀵치가 발생하여 위글러의 실제 운전용 코일로 채용하기가 어렵다고 판단되었고, 2차시작품은 다른 형태로 제작하였다.

그림 1에서 보는 것과 같이 코일의 모양은 약간의 타원형으로 레이스트랙형의 직선부에 느슨해지는 문제점을 해결하였고 시작품 코일은 상하로 분리되고 대각선방향에서 이질적인 첨가물(carbon plastic)이 삽입하는 등 매우 복잡한 구조로 되어 있어 제작과정에 많은 어려움이 코일의 성능에 직접 영향을 주어 문제를 야기했는데, 많은 시행착오를 거쳐 그림 1에서 보는 것과 같이 단순화하여 제작상의 오차의 개입여지를 근본적으로 제거하였다.

곡선부에 초승달 모양의 스페이서를 채용하여 자장의 집중 효과를 경감하려 하였으나 이 효과보다는 스페이서와 코일간의 간격에 의한 미끄러짐 효과로 퀵치를 유발하는 결과를 초래하였는데, 최종 제품에서는 스페이서를 제거하여 미끄러짐을 방지하였다.

그러나, 본제품 코일의 곡선부에서 자기장의 집중으로 최대 자기장이 낮아지는데 위글러의 동작값에 영향을 줄 정도는 아니다. 또 시작품에서 4개의 코일로 구성되어 있으나, 본제품 코일에서는 두 부분으로 구분되고, 실제로는 한 개의 코일로 이루어져 각 코일간의 연결단자를 없애 연결부에서 저항의 감소로 열손실을 줄였다.

위글러에 전류를 인가할 때 코일의 바깥쪽(코일 경계의 법선 방향)으로 벗어나려는 힘이 있는데, 이를 보호하기 위해 강선(stainless wire)으로 8층을 감아 이에 대항하여 코일중 간에 상호타일이 일어나지 않게 하였다.

그리고 시작품 시험 후, 코일을 절단하여 검사한 결과, 코일 사이의 공간에 epoxy resin이 묻지 않은 부위가 발견되었는데 이를 보완하기 위해서 권선시 에폭시(epoxy)를 발라가며 코일을 제작하였다.

### 2.6 전원공급장치( Power Supply)

각 코일들은 2개의 권선들로 구분되어 있으나 실제로는 직렬권선으로 감겨져 있다. 위글러전계의 회로구성은 그림 5와 같이 되어 있는데 150 A의 전원 A가 모든 보조권선에 150A(고전류)를 공급하고 주권선의 바깥쪽 보조권선에 100 A의 전원 B가 100 A(저전류)를 공급하여 이 권선에 250 A의 전류가 흐르게 되어 있다.

위글러는 2개의 부회로가 하나의 회로 구성되어 있으나 각 부회로에 사양이 같은 전원이 연결되어 각 부회로에 필요로 하는 전류를 공급한다. 또 각각의 전원에는 켄치방지용(quench protection) thyristor, capacitor 전류측정용 DCCT로 구성되어 있는데 주요 사양은 다음과 같다.

max. 전류	200A
max. voltage	10 V
input voltage	200/380 V (60 Hz)
ramping rate	~25 A/min

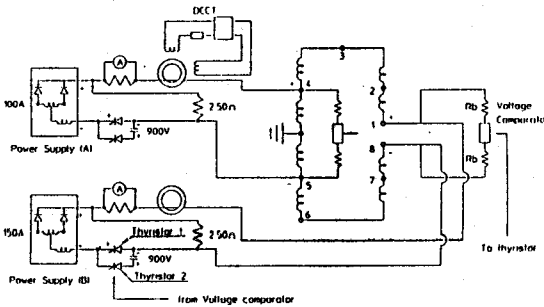


그림 3 전원공급장치 및 켄치보호회로

### 2.7 켄치보호회로(quench protection system)

그림 3에서 보는 것과 같이 두개의 회로가 대칭되게 병렬로 결선되어 있고 각 회로는 저항  $R_b$ 로 브릿지 회로를 구성하고 전압 비교기로 전압 균형이 깨어지는지를 검출하게 된다. 정상운전시 thyristor 1으로 전류가 흐르고 있다. 비교기에서 전압차가 검출되면(normal zone의 발생으로 인하여) thyristor 2에서 gate가 닫혀 900 V로 미리 충전된 커패시터에서 방전이 되면 thyristor 1에 역전압이 인가되어 게이트가 개방되고 다시 커패시터에서 모두 방전되어 thyristor 2가 개방되어 전원 회로로 가는 전류가 단절되고 텀프 저항을 통하여 전류 회로가 형성되어 이 저항에서 인덕턴스에 의한 코일 내부 에너지의 상당 부분이 극저온용기 외부로 방출된다.

### 2.8 자장측정

자장측정으로 쓰던 홀소자(hall probe)가 액화헬륨 탱크 내에서 망가져서, 결국 7.5T의 자장측정은 전류값에서 추

정하는 방법을 이용하였다. hall probe는 액화헬륨내에서 얼마간 작동한 후 고장나서 probe의 소자물질을 현미경으로 관찰했더니 probe소자물질이 원인모르게 증식되어서 제대로 작동할 수 없었다. 정확한 측정은 아니지만 입력전류 값에 의한 자장해석을 하여 중심자장을 유추하였다.

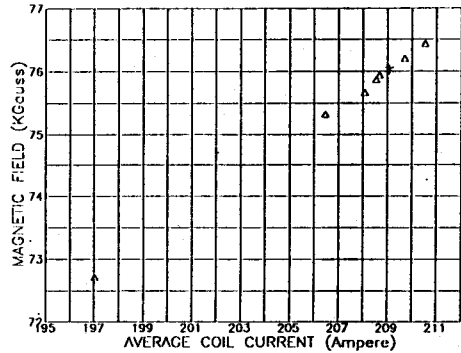


그림 4 계산된 자장

## 3. 결 론

본 연구에서는 방사광가속기의 이용범위를 넓히기 위한 초전도위글러에 대해서 알아보았다. 초전도관련기술의 개발은 국내에서는 그 기반이 취약하여 연구진행중 어려움이 많은 실정이나, 많은 시행착오를 거쳐 개발된 초전도 위글러는 앞으로 포항방사광가속기에 설치되어 이용될 예정이다. 본 연구 중 경험한 고자장초전도전자석 제작의 경험은 극저온진공공학, 초전도선재권선처리기술, 헬륨급배장치, 켄치보호회로설계 등에 파급효과가 있으리라 생각된다.

## 4.참고문헌

- [1] INP 출장보고서, PLS,1993
- [2] INP 출장보고서, PLS,1995
- [3] Wilson, Superconducting Magnet, Addison-Wesley, 1977

Abstract - This paper describes a 7.5 T magnetic flux density superconducting wiggler that minimize net angular deflection and displacement of an electron rotating along the orbit at storage ring in Pohang Light Source. It consist of dipole superconducting magnet,high uniformity flux distribution due to current source supply,cryostat,vacuum chamber,measurement system. In this paper magnet design procedure, manufacturing, experimental results are contained.