

# 방사광가속기용 2극 전자석의 제작과 특성연구

김 방광, 최 성덕, 박 성태  
/현대중전기(주)

The manufacturing review and performance study  
of Synchrotron Radiation (S.R) DIPOLE MAGNET

Bang-Kwang, Kim ; Sung-Duk, Choi ; Sung-Tae, Park  
Hyundai Electrical Engineering Co., LTD

Abstract: The electrons, which are accelerated to nearly light speed from LINAC(Linear Accelerator), put into Storage Ring.

And this electrons circulate in an ultra high vacuum chamber and their orbit is controlled by the electromagnets such as DIPOLE, QUADRUPOLE, SEXTUPOLE & CORRECTION MAGNET.

Among them, the dipole magnet is to bend the electron and to produce Synchrotron Radiation(S.R). This paper describes the key point during manufacturing of this magnet, and introduce the field measurement results of the HEECO's successful prototype.

## 1. 서 론

먼저, 방사광가속기에 대하여 간단히 소개한다면 전자를 발생시켜, 선형가속기에서 거의 빛의 속도로 가속시킨 후, 이를 도우너즈형의 저장링 속을 무한궤도로 순환토록 하여, 중간에 설치된 다수의 DIPOLE MAGNET와 UNDULATOR 및 WIGGLER에서 방사광(Synchrotron Radiation)을 발생시키는 장치이다. 이 방사광은 고강도의 X-선에서부터 적외선에 이르는 넓은 영역의 파장을 가진 푸른 빛으로서 원자단위의 구조분석, 256 M-DRAM의 집적회로제작, 분자생물학, 생명공학, 금속재료 공학 및 의료과학분야 등, 그 이용 가치가 매우 높다. 이번에 당사는 2 GeV의 포항가속기 저장링용 dipole magnet 시제품을 PAL연구팀과 공동개발에 성공하여 이를 소개하고자 한다.

## 2. 설계사양

2.1 저장링용 Dipole magnet의 역할과 원리  
가속된 전자가 저장링(Storage Ring)의 Dipole

magnet에 입사되면 2극의 균일한 자계 下에서 LORENTZ'S FORCE를 받아 진행경로를 꺾이게 됨과 동시에 방사광이라는 빛을 발생토록 한다. 따라서, 본 dipole magnet는 균등한 자계를 일정하게 유지하는 것이 가장 중요하다.

### 2.2 기본 사양

기본설계는 포항공대측의 포항가속기(PAL)연구팀에 의해 2차 Poisson computer code 및 FEA computer code 를 사용하여 CAD되었으며, 여기서는 간략한 소개만 한다.

표.1 The parameter list of the Storage ring Dipole Magnet at 2 GeV. (2.5GeV)

Bend Angle	[degree]	10
Magnetic Flux Density [Tesla]		1.058(1.323)
Effective Magnetic Length[mm]		1100
Magnet Gap on orbit	[mm]	56
Good field width	[mm]	± 30
Good field height	[mm]	± 18
Ampere-Turns(EFF.=98%)		47,840(59,916)
Number of turns		72
Current	[A]	660(832)
Voltage Drop/magnet	[V]	12.97(16.37)
Conductor sect. area [sq.mm]		215.7
Current Density [A/sq.mm]		3.06(3.86)
Power Dissipation/Magnet [KW]		8.55(13.62)

\* NOTE; Main coil의 beam orbit correction을 위한 56turn/pole의 trimming coil을 설치함.

다음은 DIPOLE MAGNET OUTLINE(시제품용)이다.

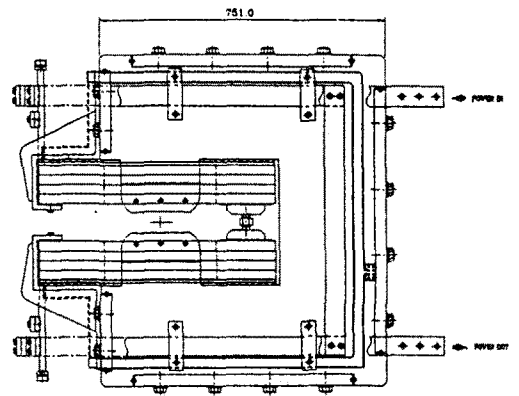
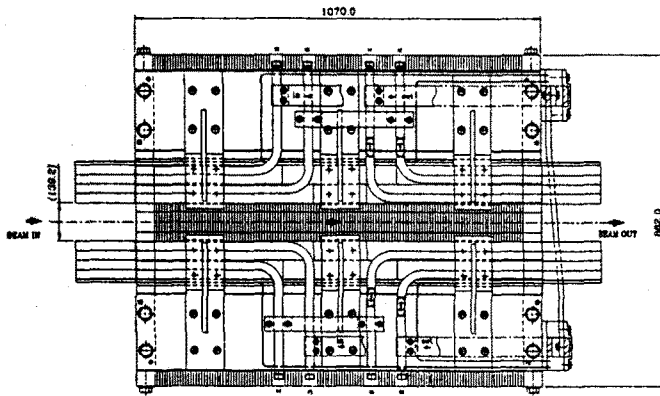


그림.1) S.R DIPOLE MAGNET OUTLINE (prototype)

2.3 low carbon steel(저탄소강)의 채택

본 magnet는 일정한 직류 전원을 공급 받으므로, 규소강판대신 carbon함량 0.008%이하의 저탄소강판을 사용하여 보자력(Hc)은 1.4 Oe미만이고, 100 Oe에서의 자속밀도(Bs)는 18,000 Gauss를 초과토록 개발되었다.

또한, 가속기용 전기강판의 특성을 위하여

- 1) 일반 냉연강판보다 Bs가 높다.
- 2) 강판 제조 시 Skin Pass를 압도록 하여 Punching시 내부응력에 의한 변형을 방지함.
- 3) Silicone을 첨가하여 Hardness를 Hb55로 증대시킴.
- 4) 두께편차를 폭방향 ± 5 micron, 길이방향으로 ± 15 micron/2Km이내로 관리하였다.

단위; [%max]

	C	Si	Mn	P	S	N
규정치	0.008	0.25	0.42	0.03	0.008	0.005
실제치	0.006	0.38	0.25	0.028	0.007	0.0021

표2. LOW CARBON STEEL CORE의 화학 성분

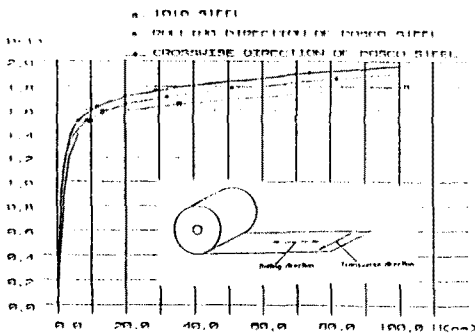


표3. B-H Curve of the low carbon steel

2.4 OXYGEN FREE HOLLOW COPPER CONDUCTOR사용

MAGNET는 수냉각 방식을 채택하여, 도체내부의 HOLE속을 냉각수(Low Conductivity Water)가 순환토록 하고, ASTM C10200 에 준한 도전율101% IACS이상의 무산소(oxygen free)동을 사용했다.

\*\*\* 도체 사양 ;

- 1) DIMENSION; 16mm X 16mm (1.5 corner R)



WITH HOLE ( 7 mm Dia.)

- 2) TENSILE STRENGTH(ANNEALED) ; 225 N/mm<sup>2</sup>
- 3) BEND TEST ; GOOD
- 4) STEEL BALL(6.35mm Ø) PASS ; O.K
- 5) Thermal Conductivity ; 399 W/ C m

2.5 epoxy resin for vacuum molding  
먼저, 도체의 소선접연을 위해 도체외피에 No-varnish의 double polyester(dacron) fiber/glass fiber covering한 도체를 구입방안도 고려할 수도 있겠으나, 도체가 굵은 경우는 key-stone현상에 의한 절연피복의 터짐현상이 우려되어 당사에서는 권선 작업 시에 직접 Polyester tape와 Polyester film및 fiberglass tape를 감아 접연처리하였다.

권선 forming후, 뒤에 소개 할 고진공상태의 molding처리를 위하여 WETTING 성능이 양호하고 경화 후 CRACK 발생율이 낮고, 내방사선특성(2 X 10E7 rads)을 가진 친연성의 2액형 epoxy resin을 사용하였다.

\*\*\* RESIN 사양 ;

- 1) DOW CHEMICAL Co.의 "DER-332"
- 2) DOW CHEMICAL Co.의 "DER-736"
- 3) 경화제; Aromatic amine hardener eutectic Mixture(방향성 아민경화제 공용 혼합물)

### 3. DIPOLE MAGNET PROTOTYPE 제작공정.

#### 3.1 제작공정;

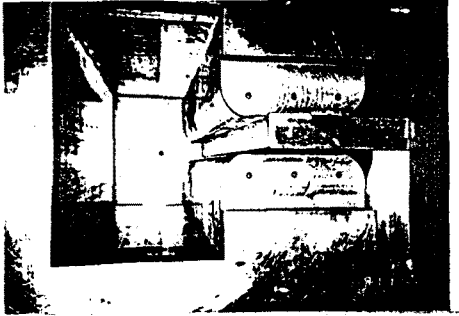


사진.1) MAGNET CORE ASSEMBLY

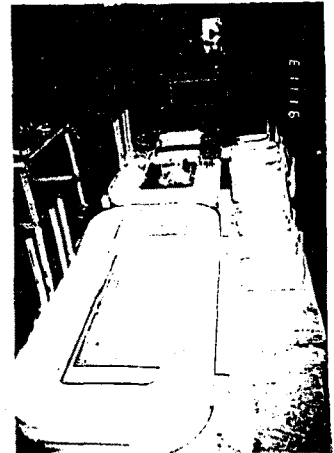


사진.2) DIPOLE COIL ASS'Y

#### 3.2 제작상의 유의점 및 해결사례

##### 1) core 급형의 제작난이;

pole lip부 형상이 비선형이며 형상공차가 25 micrometer으로 매우 tight하여 시타발품의 3차 원측정결과 불만족으로 인해, 급형을 재제작하여 겨우 만족범위로 맞추었다. 즉, 상부pole과 하부pole간의 contour가 ideal한 대칭이 되지 못하여 시제품은 돌려샐기를 생략하고 그 결과를 check하기로 함.

DATA FILE : DT1001 NOMINAL FILE : NM8881  
M-DATE : 91/10/04 WORK NAME : CORE LAMINATION  
MODEL NO. : 1 M-USER : KIM, C.S  
CONDITION : PM 1.5 1.5 DM 300.TOL. 025 - 025

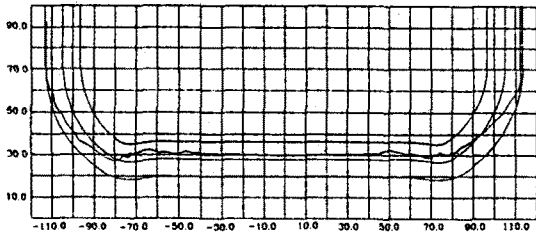


그림.2) pole contour dimension 측정 결과

##### 2) burr허용치 5 micrometer;

core의 재질이 물러 burr가 커지는 경향이 있어, 급형의 상부(punch)와 하부(dies)의 틈새를 정확히 맞추어야 한다. (편측 75 micrometer)

##### 3) core 적층공차 + 25 micrometer ;

석정만 위에서 정교한 stacking fixture를 사용하여 pole lip부를 기준하여 적층하였다.

##### 4) tension plate에 의한 적층상태 유지;

전체중량이 약 5250 Kg(권선포함)의 중량을 양쪽 END PLATE에 직각으로 걸쳐진 TENSION PLATE로 적층압에 의하여 지지하는 구조이므로, 가압공정은 LAMINATION 적층 중간중간에 여러차례 40TON(4.9± 1.6 Kg/mm<sup>2</sup>)을 가하여 최종가압 상태에서 dowel pin으로 고정시켰다.

##### 5) 용접없는 2층권선 ;

권선 1회분량의 반(half)되는 지점을 찾아 반은 시계바늘 방향으로 감은 후, 나머지 반을 반시계방향으로 2층이 되도록 감았다.

##### 6) 고진공 EPOXY MOLDING ;

주제와 경화제를 섞을 때 약 10E-3 Torr이상의 고진공상태를 만족치 못할 경우 MOLDING내부에 기포가 발생되었다. 합침중에는 IMPREG. 탱크속에 코일이 든 MOLDING DIES를 위치하고 HOSE로 외부의 NIPPLE를 통해 MIXING TANK와 연결되어 있는데, MIXING TANK내의 진공을 풀어 RESIN을 주입한다.

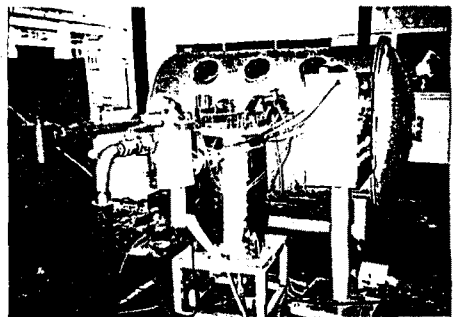


사진.3) 고진공 MOLDING 설비

##### 7) RESIN의 발열현상 ;

상기 합침작업 후 COIL은 MOLDING DIES에 든 상태로 OVEN에 넣어 CURING하는데 본 EPOXY는 자체발열로 가열 및 열팽창으로 인해 MOLDING DIES내의 RESIN이 HOSE를 통해 흘러 넘쳐 VOID(기포는 아니었음)가 발생되었음. 이에 대해 당사는 저온의 온도조정이 힘든 OVEN을 피하고 더운 50도정도의 물을 이용하여 HOLLOW HOLE속을 순환시키는 방식으로 1차CURING후, OVEN에서 POST CURING을 실시하여 해결하였다.

#### 4. DIPOLE MAGNET의 검사 및 시험

##### 4.1 제작처에서의 검사 항목

###### 4.1.1 소재검사

- 1) CORE용 강판 : \*화학성분 \*경도 \*자화특성  
\*치수공차 \*표면상태 및 평탄도
- 2) COPPER : \*도전율 \*인장강도 \*굴곡시험  
\*치수공차 \*강구공과 \*외관상태

###### 4.1.2 중간공정검사

- 1) LAMINATION CORE : \*치수검사 \*표면상태 및 Burr검사
- 2) 적층CORE : \*적층압력 \*적층길이 \*POLE TIP 적층공차
- 3) COIL : \*권선저항 \*IMPULSE TEST \*내전압 \*누설시험 \*치수 및 외관검사
- 4) 완성품 : \*수압 및 수류TEST \*외관상태

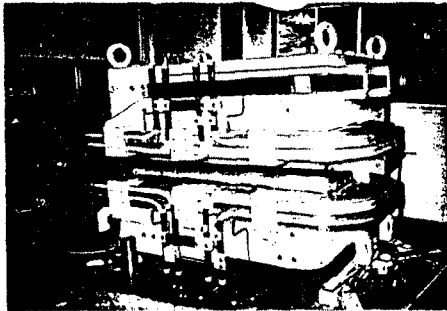


사진 4) S.R. DIPOLE MAGNET(현대중전기제작)

##### 4.2 시제품의 특성검사

본 DIPOLE MAGNET 시제품은 포항공대(가속기 연구소)로 옮겨 제반 특성시험을 아래와 같이 행하였다.

###### 4.2.1 EXCITATION PROPERTY

HALL PROBE를 POLE CENTER에 두고 GAUSSMETER로 전류치를 0~1000 Ampere범위에서 상승 및 down시키면서 이때 발생하는 자속밀도를 측정 한 결과는 아래와 같다.

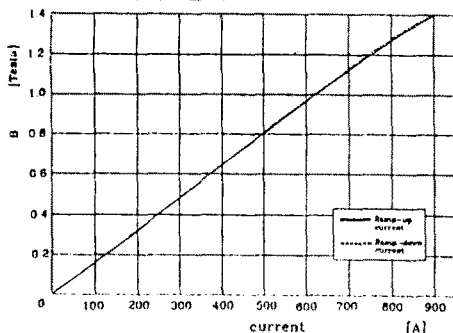


표.4 EXCITATION PROPERTIES OF THE DIPOLE MAGNET(PROTOTYPE)



사진.5) 특성시험중인 DIPOLE MAGNET 시제품

4.2.2 MAGNET의 효율과 적층유효길이의 측정  
본제품 MAGNET는 총 36대(PLS의 경우)의 특성이 허용공차(REPRODUCIBILITY)인  $1 \times 10^{-3}$  이내에 들어야 한다. 이를 위해 POLE END PIECE부의 자기포화를 최대한 억제해야 하나, 허용효율치를 만족하도록 CHAMFERING치수를 찾아 본제품에 적용해야 한다. 이를 위하여 여러치수의 CHAMFERED PIECE를 MAGNET에 교체해 가면서 DIPOLE ROTATING COIL을 사용, 시험한 결과는 다음과 같다

	2 GeV(660A)		2.5 GeV(830A)	
	UNCHF.	20X20Chf	UNCHF	20X20Ch
Mag. eff	99.4	99.7	97.0	97.6
Leff	1.1371	1.1195	1.1256	1.1238

$$\text{여기서 Magnet eff.} = \left( \frac{\int B dl \text{ at } A / \text{Amp}}{\int B dl \text{ at } A / A: 4000} \right) \times 100 [\%]$$

$$Leff = \int B dl / B \text{ center} \quad [MR]$$

또한, 여자전류치 변동에 대한 Leff의 변동이 CHAMFERING 처리한 경우가, 안한 경우보다 적다는 것을 알 수 있었다.

###### 4.2.3 MULTIPOLE ERROR MEASUREMENT

BEAM DYNAMIC REQUIREMENT의 만족여부를 확인하는 시험으로서 원인 및 시험결과만 요약하여 소개한다.

1) SKEW QUADRUPOLE COMPONENT는 POLE PROFILE의 비대칭으로 인하여 발생되며 여자전류변화에 대하여 선형으로 변화하였으나 이 값은  $5 \times 10^{-5}$ 미만으로 미약하므로, 본제품MAGNET의 경우도 돌려쌓기를 굳이 할 필요가 없을 것으로 해석하였다.

2) NORMAL QUADRUPOLE COMPONENT는 POLE간의 GAP CLOSURE 현상에 따라 전류의 제곱치에 비례하며 POLE 바깥쪽이 더크게 좁혀들어 MAGNETIC PATH 차이에 의한 FORCE와 서로 상쇄 되었다.

3) SEXTUPOLE ERROR는 POLE-END의 FRINGE FIELD로 인해 생겨서 주어진 허용치를 초과하였다. 이를 보정키 위하여 CHAMFERED POLE END의 양쪽에 SHIMS를 붙여 시험한 결과 허용오차내에 만족되었다. ( $b3L/B(1)L$ ;  $3.0 \times 10E-4$ )

4.2.4 시험결과에 의한 본제품의 POLE END 부 설계확정 ;

시제품의 상기와 같은 시험결과를 갖고 본 제품(PRODUCTION TYPE)에 대하여 POLE END의 PROFILE형상은 다음과 같이 최종결정되었다.

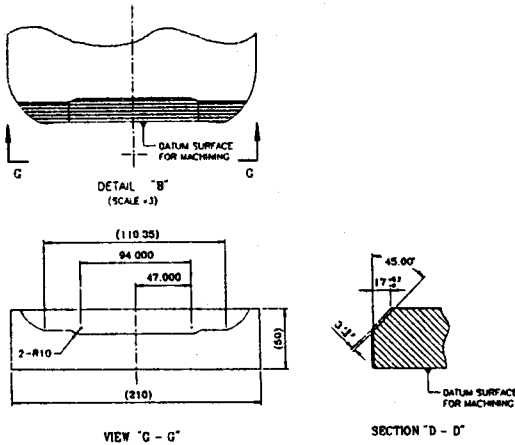


그림.3) POLE END LAMINATION- ENTERANCE부의 CHAMFERING치수(본제품 적용예정)

5. 결 론

이번 국내 기초산업의 육성을 위하여 포항공대에 설치되는 포항가속기를 위하여 국내 학계와 업체의 공동노력으로 시제품 DIPOLE MAGNET를 성공시킨 것은 그 의의가 크다고 하겠다.

그러나 현재 진행중인 QUADRUPOLE, SEXTUPOLE, CORRECTOR의 시제품개발도 그 정밀성에 있어 세심한 주의가 필요하며, 본제품 제작 시에는 REPRODUCIBILITY값을  $1 \times 10E-3$ 이내로 품질안정시키는 문제가 남았다. 향후 초전도체의 실용화와 더불어 세계 각 선진국에서 연구개발 중인 초전도체를 이용한 입자가속기분야를 개발하는데 학계와 업체의 많은 기술 교류가 있어야 할 것으로 본다.

6. ACKNOWLEDGEMENT

그동안 시제품개발을 위해 지도/협조해 주신 포항가속기연구소(구 양모박사, 강 봉구박사, MR. MILBURN 외 MAGNET TEAM연구원들)는 물론, 포항제철 및 협력업체(중앙산업, 대룡진공)와 3차원정밀측정을 위해 적극협조해 주신 현대자동차 소재금형부에 깊은 감사를 드립니다.

以上.