

# Insert dewar 를 이용한 초전도 MRI 마그네트의 자장분포 평가

진홍범, 오봉환, 권영길, 오상수, 조전우, 하동우, 이인용, 류경우, 류강식, 한일용\*, 나완수\*\*  
한국전기연구소 초전도 응용연구사업팀, 대성전선(주)\*, 성균관대학교 전기공학과\*\*

## Magnetic Field Distributions of Superconducting MRI Magnet in Insert Dewar

H.B.Jin, B.H.Oh, Y.G.Kwon, S.S.Oh, J.W.Cho, D.W.Ha, E.Y.Lee, K.W.Ryu, K.S.Ryu, I.Y.Hahn\*, W. Nah\*\* Korea Electrotechnology Research Institute, Daesung Electric Wire Co.\*, Sungkwunkwan University\*\*

Abstract- This paper describes the test results of magnetic field distributions of superconducting MRI magnet in an insert dewar. To get a very high homogeneous magnetic field, various shim coils are installed besides the main magnet. The operating currents of each shim coils are obtained from the exact measurements of the magnetic field. In this paper, we report the test results of the magnetic field distribution measurements with various shim coils.

구전류스위치의 낮은 저항값과 주코일, Z<sup>2</sup> shim 코일간의 강한 상호인덕턴스에 그 어려움이 있다고 하였다. 이것에 대한 자세한 분석은 다른 논문에서 보고하기로 한다.

### I. 서론

본 논문에서는 Insert dewar 를 이용한 초전도 MRI 마그네트의 자장분포 측정결과에 대하여 보고한다. 일반적으로 MRI 마그네트는 30-50 cm dsv (diameter of spherical volume) 에서 1 - 10 ppm 의 자장 균일도가 요구되며, 이것을 구현하기 위하여 주코일 (main coil) 이외에도 많은 보조코일 (shim coil) 이 필요하다. 이러한 보조코일들로 자장의 균등성을 향상시키기 위해서는 각 보조코일들의 동작전류점을 결정하여야 하고, 이것을 위해서는 각 단계에서 마그네트 보아 공간 내에서의 정확한 자장 측정이 필수적이다. 여기에서는 X,Y,Z,Z<sup>2</sup> shim 코일을 부착한 초전도 마그네트에서 각각의 shim 코일들이 어떻게 보정되고, 또 보정한 후의 자장 분포가 어떠한 특성을 갖는지에 대하여 기술한다. 자장의 측정을 위하여 (상온에서 동작하는) 고자장에서 자장 해상도가 뛰어난 NMR probe 가 사용되었으며, 마그네트 내부 공간에 상온 영역을 제공하기 위하여 insert dewar 가 마그네트의 내부공간에 삽입되었다.

### III. 초전도 MRI 마그네트 자장분포 측정장치

제작된 마그네트는 일반 범용 크라이오스타트에 설치되었으며 마그네트 내부의 자장을 NMR probe (Nuclear Magnetic Resonance probe)로 측정할 수 있도록 특별히 insert dewar 를 제작하여 마그네트 내부에 삽입하였다. 이것은 원시적인 상온보아의 크라이오스타트 (room temperature bore cryostat) 라고 할 수 있다. 이러한 상온보아 크라이오스타트가 필요한 이유는 정밀자장 마그네트의 자장은 일반적인 홀센사로는 그 정확도가 멀어지므로 사용할 수 없으며, 따라서 정밀한 고자장을 측정하는데에 최고의 정밀도를 가진 NMR probe 를 사용하여야 한다. 그런데 NMR probe 는 NMR sample 로서 물 또는 중수 (H<sub>2</sub>O, 또는 D<sub>2</sub>O) 을 사용하며, 이것들은 극저온에서 사용할 수가 없기 때문에 마그네트 자장분포 측정을 위하여 상온보아 크라이오스타트가 반드시 필요하다. 또 insert dewar 의 제작은 궁극적인 MRI용 상온보아 크라이오스타트를 제작하는데에 기술을 축적하는 의미도 내포하고있다.

### II. 초전도 MRI 마그네트의 사양

그림 1은 본 시험에서 사용된 초전도 마그네트의 단면도이다. 그림에서 볼수있듯이 주코일은 5 개의 솔레노이드로 이루어져있으며, Z 및 Z<sup>2</sup> shim 코일은 각각 2 개, 4 개로 이루어져있으며 Z 축상의 자장 하모닉스성분을 보정한다. 이 마그네트에는 Z shim 코일 이외에도 X shim 코일 및 Y shim 코일이 부착되어 있으며 이것들은 솔레노이드에 radial 방향으로 구부러져서 (Bending) 설치되어있다. 이것들에 대한 자세한 사양 및 설계기법은 참고문헌 [1],[2] 에 기술되어있다.

본 시험에 사용한 NMR probe 는 미국의 METROLAB 사의 모델명 "PT2025 NMR Tesla meter"를 사용하였다. 이것은 해상도가 10<sup>-7</sup> T 이고 측정범위는 0.011 - 13.7 T 의 사양을 가지고 있다. 자장을 측정할 때는 knob을 조정하면서 자기세기에 맞는 핵자기공명주파수를 찾아서 맞추어 준다. 이 NMR probe 를 원하는 곳에 위치시키기 위하여 또, probe 가 위치한 곳의 정확한 좌표값을 알기 위하여 X-Z stage 를 제작하여 사용하였다. 이것은 손잡이를 회전시킴으로서 probe를 상·하 또는 좌우로 움직일수 있으며, 또 따로 원판을 회전시킴으로서 probe 를 원하는 어떤 곳에도 위치시킬수 있도록 제작되었다. 그리고 위치의 정보는 1 회전당 500 펄스를 출력하는 엔코더 (encoder) 의 펄스 수를 카운터로 헤아려서 위치의 정보를 인지 할수있도록 제작되었다. 나사산의 피치가 5 mm 이고 나사가 1 줄 나사이므로 1 회전당 나사산은 5mm×1=5mm 전진 또는 후퇴하고 엔코더가 1 회전당 500 펄스를 출력하므로 본 X-Z stage 의 공간 분해능은 5mm/500pulse = 0.01 (mm/pulse) 가 된다.

이 마그네트는 초전도 영구전류 스위치 (Superconducting Persistent Current Switch) 가 마그네트와 병렬로 연결되어 있기 때문에 일반적으로 이것을 가지고 있지 않은 초전도 마그네트의 어차와는 달리 세심한 주의가 필요하다. 이것은 영

위의 NMR probe 에서 출력하는 자장값 및 XZ-stage 에서 출력하는 위치정보 데이터는 직접 PC 로 저장될 수 있도록

장치하였다.

#### IV. Shim 코일에 의한 자장분포

본 장에서는 X,Y,Z,Z<sup>2</sup> shim 코일장치의 공간분포를 측정할 결과에 대하여 기술한다. 이것은 shim 코일의 암페어·cm 당 gradient 를 측정하는 것이 주 목적이고, 또 다른 목적은 probe 의 절대 공간좌표를 확립하는 것이다. 즉, 마그네트 보아 내부의 원점을 찾는 것이 부차적 목적이다.

그림 2와 그림 3은 각각 X,Y,Z, 및 Z<sup>2</sup> shim 코일을 5 A 로 여자했을 때의 공간상의 자장분포를 보인다. 이 shim 코일들의 자장은 모두 10 gauss 미만이므로 NMR probe로 직접 측정할수는 없다. 따라서 그림에서 보인 값들은 먼저 주코일을 영구전류모드로 운전하여 NMR probe 로 측정할 수 있도록 약 2 T 의 background field 만든 후에, 각각의 shim 코일을 여자하지 않은 상태에서 공간적인 자장분포를 측정하고, 각각의 코일들을 여자한 후에 다시 자장분포를 측정하여 두 값의 차이를 이용하여 얻은 값들이다. 그림들에서부터 모든 shim 코일들이 각각의 전형적인 자장분포 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다.

최소 사승법 (least square method)을 이용하여 X,Y,Z shim 코일 각각의 자장분포를 1 차함수로 fitting 한 결과를 다음에 정리하였다. 단위는 gauss · cm 이다.

$$X \text{ shim 코일: } B_x(x) = 0.8709 + 0.6548 \cdot x,$$

$$Y \text{ shim 코일: } B_y(y) = 0.7145 + 0.6246 \cdot y, \quad (1)$$

$$Z \text{ shim 코일: } B_z(z) = 1.8718 + 1.0207 \cdot z$$

만약 X-Z stage 의 원점이 맞은 상태라면 위 식들의 상수항이 나타나서는 않된다. 즉, 위 식의 의미는 X-Z stage 의 원점이 맞지 않았다는 뜻이고 따라서 원점교정을 해야한다. 원점교정은 probe 를 현 위치에서 X 축으로 + 0.8709/0.6548 = 1.33 cm 만큼, Y 축으로 + 0.7145/0.6246 = 1.14 cm 만큼, 그리고 Z 축으로는 + 1.8718/1.0207 = 1.83 cm 만큼 이동시킨 후 그 곳을 새로운 원점으로 간주하면 된다.

이와 같이 원점을 교정한 후에 측정된 그림 3의 Z<sup>2</sup> shim 코일 자장분포를 2 차 함수로 fitting 한 결과는 다음과 같다.

$$Z^2 \text{ shim 코일: } B_z(z) = -118.9233 + 0.037091 \cdot z + 0.257692 \cdot z^2 \quad (2)$$

위 식의 상수항은 이미 공간적인 원점은 교정이 된 후 이므로 원점교정이 잘못된 것을 의미하는 것은 아니고, Z<sup>2</sup> shim 코일이 원천적으로 설계할때부터 가지고있는 균등자장 성분이다. 이것은 전 공간상으로 자장의 세기를 변화시키지만 자장의 균등도에 영향을 미치지 않는다. 반면 미소하나마 z 의 계수가 존재하는데 이것은 Z<sup>2</sup> shim 코일을 제작할때 엄밀한 대칭성을 구현하지 못한데에서 기인한 것이다. 그러나 계수 자체는 무시할 수 있을만큼 작다. 사실 Z<sup>2</sup> shim 코일의 자장분포 데이터를 3 차 또는 4 차 함수로 fitting 시켜도 3 차 또는 4 차항의 계수가 미소하게나마 계산된다. 그러자 이것 또한 무시할수있을 만큼 작으므로 문제점을 야기시키지는 않는다.

표 1 각 shim 코일의 gradient

	X shim coil	Y shim coil	Z shim coil	Z <sup>2</sup> shim coil
gradient	0.13096 (gauss/cm·A)	0.12492 (gauss/cm·A)	0.20414 (gauss/cm·A)	0.0515384 (gauss/cm <sup>2</sup> ·A)

이제 X,Y,Z,Z<sup>2</sup> shim 코일의 1차 및 2 차항의 계수를 이용하여 각 shim 코일의 gradient 를 구해본다. 이것은 모든 코일을 5 A 로 여자시켰기 때문에 각 계수를 5 로 나누어 주면

간단히 계산된다. 표 1에 이것을 정리하였다.

#### V. X-Y 평면상에서의 자장분포

지금까지 X,Y,Z,Z<sup>2</sup> shim 코일에 의한 자장분포를 통하여 X-Z stage 의 원점교정 및 각 shim 코일의 gradient 를 구하여 보았다. 여기에서는 X-Y 평면상에서의 자장분포를 주코일만을 여자하였을 때와 X 및 Y shim 코일을 여자하였을 때로 나누어서 살펴보기로 한다. 그리고 한가지 언급할 것은 지금부터 코일을 여자한다고 함은 코일을 영구전류모드로 운전함을 뜻한다. 이것은 마그네트의 자장분포 측정에 소요되는 시간이 길기때문에 영구전류스위치 히타로 인하여 헬륨의 증발을 억제하는 것이 하나의 목적이고, 더욱 근본적인 이유는 영구전류스위치가 부착된 회로를 일정전류원으로 여자하면, 앞의 수식상에서 언급했듯이 영구전류스위치의 저항성분에 의하여 전류가 시정수를 가지고 변화하기 때문에 이에 따라서 자장이 미소하게나마 변하기 때문이다.

그림 4 는 주코일만을 여자하였을 때 X 축상의 자장분포를, 그림 5 는 Y 축상의 자장분포를 나타낸 것이다. 두 개의 그림 모두 강한 2 차성분을 내포하고 있음을 보여 준다. 그런데 만일 마그네트가 엄밀한 축대칭 (θ-symmetry)을 가지고 있다면 원칙적으로는 X 및 Y 의 변화분에 대하여는 자장의 변화가 없어야 한다. 만일 있다면 그것은 마그네트의 제작시 어 엄밀한 축대칭을 구현하지 못했음을 의미한다. 그런데 마그네트의 축대칭 구현에 영향을 주는 제작결함이 있다면, X 또는 Y 축방향상에서 대칭적으로 똑 같이 마그네트 제작결함이 있다고 보기는 어렵다. 따라서 이러한 이유라면 일반적으로 기수항 (odd terms)의 성분이 우세하게 나타난다. 그럼에도 불구하고 그림 4 및 그림 5 에서 우수항(even terms)인 2 차성분이 확연하게 우세한 것은 마그네트의 제작상의 결함보다는 다른데에서 그 이유를 찾아야한다고 사료된다.

본 마그네트는 시험장소의 협소함에 기인하여 길이 2 m 정도의 홀에 설치되어있으며 이 홀은 강자성체인 철근 콘크리트로 보강되었다. 이 강자성체는 마그네트의 주위를 거의 원점 대칭적으로 둘러싸고 있으며 그림 4 와 그림 5 에 나타난 2 차항은 이것에 기인한다고 추측된다. 이 생각은 X-Y 평면상에서 각도 (X 축에서부터의 각도: φ)를 달리해가며 자장의 분포를 측정된 데이터에서 다시 한번 확인할 수 있다.

이제 그림 4 및 그림 5 의 데이터에 포함된 기수항을 X 및 Y shim 으로 제거해 본다. 최소사승법을 이용하여 데이터를 각각 X 및 Y 의 1 차함수로 fitting 해보면 그 결과는 다음과 같다.

$$X \text{ 축상의 변화: } B_x(x) = 19455.79 - 0.1921 \cdot x,$$

$$Y \text{ 축상의 변화: } B_y(y) = 19455.4 - 0.1485 \cdot y \quad (3)$$

표 1과 위 식들에서부터 X 및 Y shim 코일에 흘러야하는 전류는 각각 + 0.1921/0.13096 = +1.47 A, 및 + 0.1485/0.12492 = 1.19 A 임을 알 수 있다. 이 전류들을 각각 X 및 Y shim 코일에 흘린 후에 측정된 자장분포를 그림 4 및 그림 5 에 중첩하였다. 즉, 이들 그림들에서부터 X 축상에서의 자장균등도가 10 cm dsv 에서 (이하의 자장균등도는 모두 10 cm dsv) 136 ppm에서 80 ppm으로 줄었으며, 또 X 축의 경우 보다는 자장의 불균일 정도가 개선된 것이 미약하지만 Y 축상에서의 자장균등도가 108 ppm 에서 100 ppm 로 줄어든 것을 알 수 있다.

마지막으로 그림 6은 X 및 Y shim 을 여자하지 않은 상태에서 X-Y 평면상에서의 자장분포를 X 축에서부터의 각도(φ)를 달리해가면서 원점을 지나는 축상에서의 자장분포를 보인 것이다. 거의 모든 각도에서 2 차항의 형태가 우세함을 볼 수

있으며, 이것은 같은 데이터를 X 및 Y shim 코일을 여자한 상태에서 측정된 그림 7의 데이터에서 더욱 확인하다. 즉, 기수항을 X 및 Y shim 코일로 제거한 후의 X-Y 평면상의 자장분포는 원점을 중심으로 거의 모든 방향에서 2 차항의 성분만 남게 된 것이다. 이것이 제작상의 결함 때문이라면 마그네트의 원점을 중심으로 모든 방향에서 대칭적으로 결함이 있다는 의미인데 거의 생길 수 없는 가정이다. 이것은 X-Y 평면상에서의 자장의 불균일이 마그네트 주변에 거의 원점 대칭적으로 존재하는 철근 강자성체에 기인한다고 하는 강한 증거를 제공한다고 하겠다. 그리고 X 및 Y shim 을 여자하지 않은 상태에서의 X-Y 평면상 자장 균일도는 159 ppm 이었으며 (그림 6), X 및 Y shim 을 여자한 상태에서의 X-Y 평면상에 자장 균일도 (그림 7) 는 101 ppm 이었다.

### VI. Z 축상에서의 자장분포

그림 8 은 주코일 만을 여자했을때(Without Z, Z<sup>2</sup> shim coils)의 Z 축상에서의 자장의 변화를 보인다. 보는 바와 같이 우수항 (특히 2 차 성분)이 우세한 자장분포를 보이며 자장균일도는 211 ppm 이다. 이와 같이 2 차성분이 우세한 자장분포는 시험전에 이미 예견된 것이다. 이것에 대하여는 마그네트의 제작면에서도 언급한 것으로, 주코일 자체를 제작할 때 사용된 선재의 직경이 마그네트 섹션마다 달랐고 따라서 권선의 절적율이 섹션마다 달라졌다. 따라서 권선수를 X-Z 평면상을 중심으로 대칭으로 만들기 위하여 주코일의 윗 부분과 아래 부분의 보빈의 원도우를 설계치보다 약간 크게하였다. 즉 X-Y 평면을 중심으로 대칭적으로 보빈의 원도우가 커졌기 때문에 기수항이 아닌 우수항의 불균일한 자장분포가 나타난 것이다.

이제 그림 8의 주코일 만을 여자했을때의 곡선을 2 차함수로 fitting 해보면 다음과 같다.

$$B_z(z) = 19454.67 - 0.172408 \cdot z - 0.132608 \cdot z^2 \quad (4)$$

따라서 Z<sup>2</sup> 의 항을 소거하기 위하여 Z<sup>2</sup> shim 에 흘려주어야 하는 전류는 표 1을 참조하여 + 0.132608/0.0515384 = 2.57 A 이다. 이 2.57 A 의 전류를 Z<sup>2</sup> shim 에 흘려주었을때의 Z 축상의 자장 분포를 그림 8에 중첩하였다. 보는 바와 같이 자장 균일도가 74 ppm 으로 향상되었으며, 2 차항 요소가 거의 사라졌고 1 차항이 우세한 자장분포를 나타내고 있다. 이 모양을 다시 1 차함수로 fitting 하여보면,

$$B_z(z) = 19396.9 - 0.1421 \cdot z \quad (5)$$

가 된다. 그러므로 Z shim 에 흘려주어야 하는 전류는 역시 표 2를 참조하여 + 0.1421/0.20414 = 0.7 A 로 계산된다. 이 0.7 A 의 전류를 Z shim 에 흘렸을 때의 Z 축상의 자장분포를 역시 그림 8에 중첩하여 표현하였다. 그림에서 보듯이 자장균일도가 대단히 향상되었으며 Z 축상의 최종적인 균일도는 11 ppm 으로 줄어들었다.

마지막으로 특기할만한 것은 Z<sup>2</sup> shim 전류를 인가하기 전의 균등자장 성분인 19454.67 gauss 가 Z<sup>2</sup> shim 전류를 인가한 후에 19396.9 gauss 로 줄어들었다는 것이다. 이것은 앞서서도 언급했지만 Z<sup>2</sup> shim 코일은 자체적으로 균등자장 성분을 가지고 있기 때문에 이것에 의해서 전체 자장이 감소한 것이다. Z<sup>2</sup> shim 전류를 인가하기 전에는 자장분포가 2 차 성분이 우세한 것이 Z<sup>2</sup> shim 전류 인가 후에는 거의 2 차 성분이 없어지면서 자장의 크기가 약 58 gauss 감소한 것이다. 그 후에 인가한 Z shim 전류는 자장의 크기는 변화시키지않고 균일도만을 향상시켰음을 알 수 있다.

### VII. 결론

마그네트 자장균등도 시험결과 X,Y,Z,Z<sup>2</sup> shim 코일의 영구 전류 동작여부는 잘 동작하는 것으로 확인되었으며, 영구전류 모드에서 주코일만의 자장균일도는 10 cm dsv (Diameter of Spherical Volume) 에서 X 축상으로 약 136 ppm, Y 축상으로 약 108 ppm, Z 축상으로 약 211 ppm 이었다. Shim 코일로 보정후의 자장균일도는 역시 10 cm dsv 의 공간안에서, X 축상으로 약 80 ppm, Y 축상으로 약 100 ppm, Z 축상으로 약 11 ppm 이었다. 이와 같이 보정된 자장의 균일도가 Z 축상으로는 균일도가 양호한 반면 X 및 Y 공간상으로는 상대적으로 대단히 불량한 균일도를 보이는 것은 마그네트 주위를 둘러싸고있는 철근 콘크리트의 영향으로 분석되었다.

### 참고문헌

- [1] "저온초전도 선재 개발 (3차년도 중간보고서)", 한국전력공사
- [2] "고균등자장발생용 초전도 마그네트 설계", 1994년도 대한전기학회 하계학술 논문집 A, 192-194

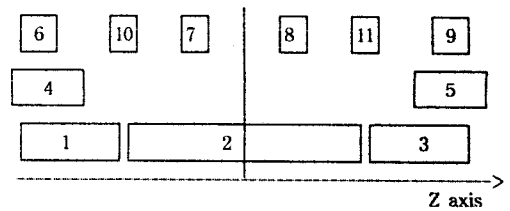


그림 1 주코일 및 Z, Z<sup>2</sup> shim 코일의 개념적인 형상 (1,2,3,4,5: 주코일 6,7,8,9 : Z<sup>2</sup> shim 코일 10,11 : Z shim 코일)

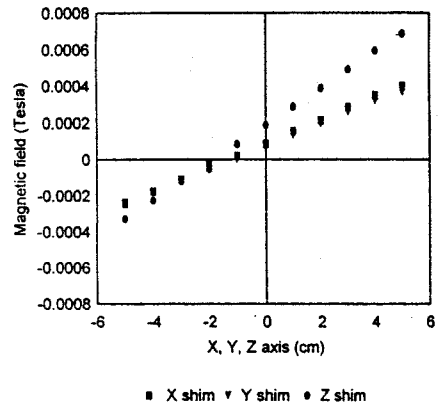


그림 2 X,Y,Z shim 코일의 X 축상 자장분포

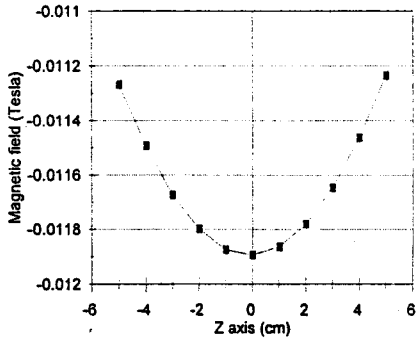
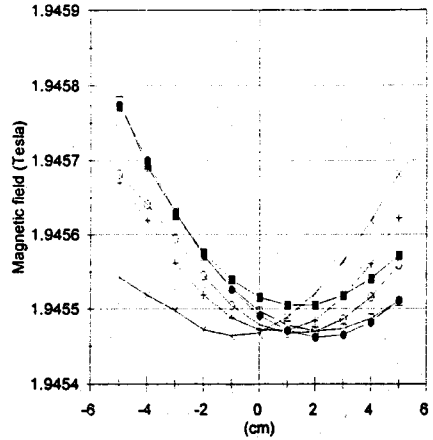


그림 3  $Z^2$  shim 코일의 Z 축상 자장분포



■ 0 degree    ◐ 30 degree    ◑ 60 degree  
 ◒ 90 degree    ◓ 120 degree    ◔ 150 degree

그림 6 주요인만을 여자했을때 X-Y 평면상에서의 자장분포

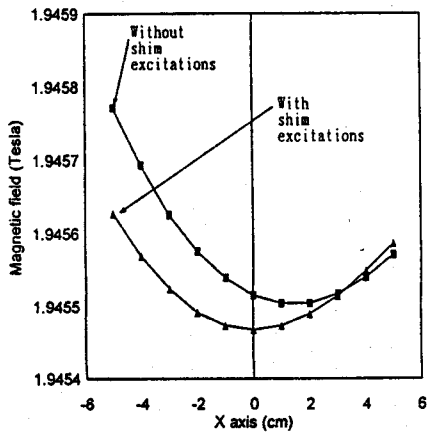
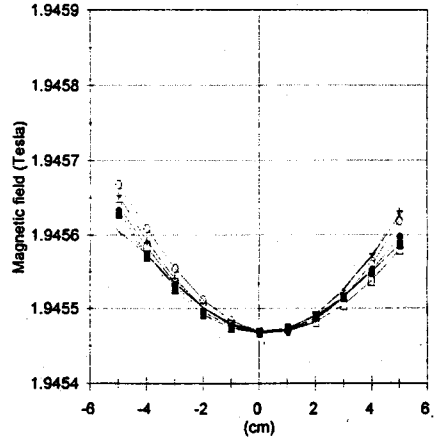


그림 4 X 축상 자장분포



■ 0 degree    ◐ 30 degree    ◑ 60 degree  
 ◒ 90 degree    ◓ 120 degree    ◔ 150 degree

그림 7 주요인과 X, Y shim 코일을 여자했을때 X-Y 평면상에서의 자장분포

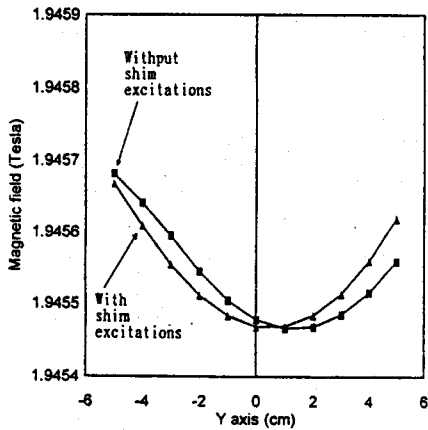
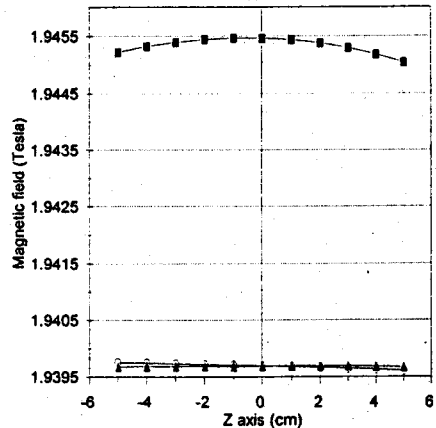


그림 5 Y 축상 자장분포



■ Without Z2, Z shims    ◐ With Z2 shim  
 ◑ With Z2, Z shims

그림 8 Z 축상에서의 자장 분포