

KAIST-TOKAMAK 철심의 투자율 측정연구

이태상 · 전상진 · 허승희 · 엄규섭 · 김재현 · 박성종 · 문세연 · 최원호
한국과학기술원 물리학과, 대전 305-701

(2001년 4월 9일 받음)

토카막 플라즈마가 초기에 안정적으로 발생하기 위해서는 진공용기 내에 적당한 크기와 모양의 null 자기장이 형성되어 있어야 하며, 또한 고 전류 플라즈마가 평형상태를 유지하기 위해서는 적절한 세기의 수직 및 수평 자기장이 필요하다. KAIST-TOKAMAK에서 이 자기장은 여러 개의 전자석에 의해 제공되는데, 토카막의 중심에 위치한 철심(iron core)의 자화(magnetization)에 의한 표면전류에 의해 자기장이 더욱 효과적으로 플라즈마영역에서 만들어진다. 이 때 발생된 자기장의 세기 및 방향에 대한 정확한 정보를 알기 위해서는 철심의 투자율을 정확히 알아야 한다. 본 연구에서는 50채널의 자기장 픽업 루프를 이용하여 진공자기장을 사상(mapping)하여 자기장의 구조를 측정하였고, 이 실험결과를 바탕으로 Poisson 코드를 이용한 전산모사를 통하여 KAIST-TOKAMAK 철심의 투자율을 알아내었다. 또한, 가우스미터와 솔레노이드 형태의 전자석을 결합한 간단한 국지적 자기장 측정장치를 사용하여 철심의 상단과 하단에서 측정한 국지 자기장과, 각 측정위치에서 Poisson 코드를 이용하여 계산한 자기장이 거의 일치하는 사실로부터, 사상결과와 Poisson 코드로 구한 철심 각 영역의 투자율이 비교적 정확한 값을 확인할 수 있었다.

I. 서 론

토카막에서 저항가열코일에 의한 유도작용으로 플라즈마를 초기에 낮은 일주전압에서 안정적으로 발생시키기 위해서는 자기력선을 따라 움직이는 플라즈마 내의 하전입자들이 진공용기 벽으로 손실되는 것을 막아야 한다. 이를 위해서 적당한 모양과 크기의 자기장 null을 미리 형성시켜 그 속에서 토로이달 대칭인 자기장을 따라 플라즈마가 감금되게 해야 한다. 또한 고 전류 플라즈마가 평형상태를 유지하기 위해서는 힘균형방정식인 $J \times B = \nabla P$ 를 만족시키는 적절한 세기의 수직 및 수평자기장이 필요하다. 여기서 J 는 플라즈마 전류밀도, P 는 플라즈마 압력이며 자기장 B 는 플라즈마 전류 및 각종 PF(poloidal field) 코일에 의해 만들어진다. 특히 KAIST-TOKAMAK [1-3]에서와 같이 철심(iron core)이 있는 토카막의 경우에는 플라즈마 및 각종 코일에 의해 발생한 자기장이 철심을 자화(magnetization)시켜 진공용기 내부에 추가적인 자기장을 만들어내게 된다. 따라서 플라즈마의 안정적인 초기발생 및 평형계산에 필요한 자기장을 정확히 알기 위해서는 철심이 외부자기장에 의해 어떻게 자화되는지 알아야하는데, 이를 위해서는 철심의 자기적 성질에 대한 정확한 정보를 아는 일이 선행되어야 한다.

KAIST-TOKAMAK 철심의 투자율(magnetic permeability)은 설계당시 수천 정도였다고 알려져 있으나 [4], 현재까지 밝혀지지 않은 치명적인 손상에 의해 투자율이 상당히 감소하였을 뿐 아니라, 토카막의 상하대칭면(mid-plane)을 중심으로 철심의 투자율이 상하 비대칭이 되어 플라즈마의 발생과 제어에 큰 어려움이 되었다. 따라서

KAIST-TOKAMAK에서 플라즈마를 효과적으로 발생시키고 또한 발생된 플라즈마를 효율적으로 제어하기 위해서 철심의 투자율을 실험적으로 알아내는 일이 중요한 과제로 대두되었다. 철심의 투자율을 알아내기 위해서는 VS-M(Vibrating Sample Magnetometer), Faraday balance [5], SQUID(Superconducting Quantum Interference Devices) [6] 등과 같은 직접적인 측정방법도 있지만, 이 방법들을 이용하기 위해 KAIST-TOKAMAK 철심의 일부를 떼어내어 샘플로 만들기는 현실적으로 불가능할 뿐만 아니라, KAIST-TOKAMAK의 경우 철심의 가운데 부분이 진공용기와 토로이달 자기장(toroidal field) 코일들로 막혀있어 아예 접근이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 투자율을 측정하기 위한 직접적인 방법보다는, 진공자기장 사상(mapping) 실험과 전산코드 계산을 병행하여 얻은 두 결과를 비교하여 투자율을 얻는 간접적인 방법을 시도하였다.

제 2절에서는 철심을 포함한 KAIST-TOKAMAK에서 플라즈마를 고려하지 않은 진공자기장의 측정결과에 대해 설명하였다. 제 3절에서는 Poisson 코드를 이용한 전산모사 결과를 기술하였고, 그리고 이어서 제 4절에서는 진공자기장의 사상 결과와 Poisson 코드 계산 결과를 비교하여 철심의 투자율을 구하는 과정에 대해 논의하였다. 이렇게 구한 투자율을 확인하는 실험이 제 5절에 기술되어 있고, 끝으로 제 6절에서는 결론을 기술하였다.

II. 자속 및 진공자기장 사상

KAIST-TOKAMAK의 본체는 그림 1에서와 같이 크게

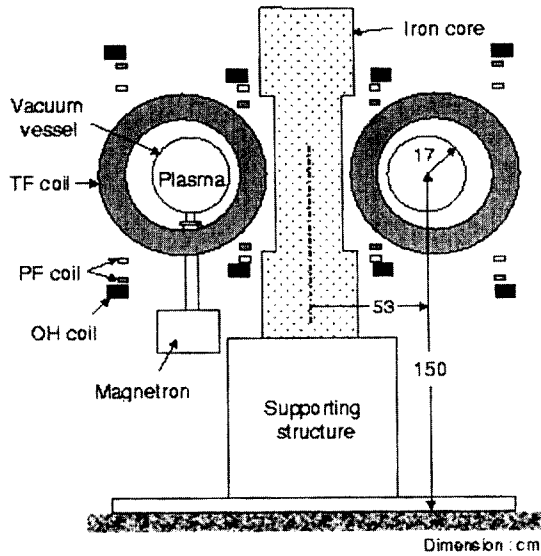


그림 1. KAIST-TOKAMAK의 개략도.

진공용기와 저항가열코일(ohmic coil), 토로이달 자기장 코일, 폴로이달 자기장 코일 등으로 구성되어 있다. 진공용기의 주반경(R_0) 및 부반경은 각각 53 cm 및 17 cm이고 플라즈마의 부반경은 14 cm이다. 토로이달 자기장은 진공용기의 중심에서 0.5 T, 플라즈마의 최대전류는 40 kA, 그리고 플라즈마 방전시간은 약 100 ms이며, 플라즈마 언저리에서의 실린더 안전인자(safety factor)는 3 이상이다.

철심은 토카막의 주축(major axis)에 위치하고 있으며 return yoke가 없는 형태로 구성되어 있다. 철심은 세 부분으로 나누어져 있으며 각 부분의 단면은 사각형으로, 마치 두꺼운 책이 서 있는 것처럼 여러 장의 철판이 절연물질을 사이에 두고 뭉쳐져 그림 1에서 보이는 것과 같이 높이방향으로 서 있다. 철심은 토카막 진공용기 내에서 저항가열코일에 의한 수직 부유자기장(stray field)을 최소화하여 약 3 G 이하가 되도록, 그리고 부유자기장 null의 위치가 진공용기의 중심에 위치하도록 설계되었다 [7]. 본 토카막은 미국 텍사스대학에서 설계, 제작되어 연구에 이용되다가 현재의 위치로 옮겨 실험연구에 활용되고 있는데, 철심의 구조에 대한 상세한 설명이나 설계 시 철심의 자기적 성질이 어떠한 것인지 등과 같은 귀중한 정보는 철심의 자기적 성질을 나타내는 변수 중 하나인 투자율이 수천 정도였다 [4]는 것 외에는 현재 남아있지 않은 상태이다. 운반도중 현재까지 밝혀지지 않은 치명적인 손상에 의해 플라즈마의 발생과 제어에 큰 어려움이 있어, 철심의 자기적 성질에 대한 연구가 안정된 플라즈마 발생 및 유지를 위한 중요한 과제로 대두되었다.

우선, 토카막의 상하대칭면을 중심으로 철심의 아래-위쪽 자기적 성질이 얼마나 대칭적으로 유지되고 있는지 알아보기 위해, 그림 2(a)와 같이 철심의 세 부분(아래로부터 영역 I, II, III으로 칭함) 중 영역 I과 III을 감싸도록 대칭이 되는 서로 다른 여섯 위치에 자속루프를 감고, 시간에 따라 변하는 전류를 저항가열코일에 흘린 뒤 각 자속루프에 유도되는

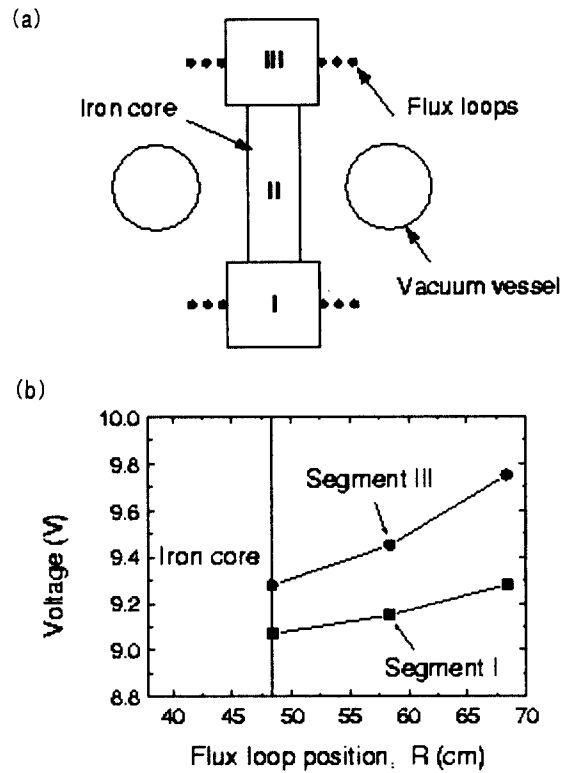


그림 2. 토카막의 상하대칭면을 기준으로하여 철심의 자기적 성질이 아래-위 대칭적으로 유지되고 있는지 알아보기 위해 설치된 (a) 자속루프의 위치와, (b) 철심영역 I과 III에서의 자속측정 결과.

유도전압을 측정하였다. 유도전압은 자속의 시간변화율이므로 어느 한 시각에서의 값은 자속과 비례한다고 볼 수 있다. 이렇게 측정된 각 자속루프의 신호를 보면, 그림 2(b)에서와 같이 철심의 아래 부분인 영역 I을 통과하는 자속이 영역 III을 통과하는 자속보다 작다. 이것은 영역 I쪽에서 철심 밖으로 빠져나오는 자속의 크기가 영역 III 쪽보다 크다는 것을 의미하며, 철심의 자기적 성질이 토카막의 상하대칭면을 중심으로 아래-위 비대칭인 것을 나타낸다.

또한, 철심의 투자율이 설계 시의 값과 비슷한 지를 알아보기 위해 저항가열코일을 이용하여 진공자기장을 측정하였다. 플라즈마가 없을 때, 전자석 및 철심에 의해 발생하는 자기장인 진공자기장을 측정하기 위하여 총 50 채널의 자기장 픽업루프를 이용하였다. 보정상수는 헬름홀츠 코일을 이용하여 시간에 따라 변하는 자기장 하에서의 자기장 측정치와 적분기를 통과한 픽업루프 신호를 비교하여 결정하였다. 보정상수 결정은 각각의 픽업루프와 적분기에 대해서 이루어졌으며, 적분기의 DC offset 에러에 의해 픽업루프에서 측정되는 자기장의 최대 에러범위는 1 G 이하이다. 그림 3에서 진공용기 주위의 작은 원들은 픽업루프들의 위치를 나타내는데, 각각의 위치에는 수직자기장(B_z)와 수평자기장 (B_R)을 동시에 측정할 수 있도록 두 개의 픽업루프들이 서로 수직이 되게 쌍으로 설치되어 있다. 각 픽업루프는 실린더 모양의

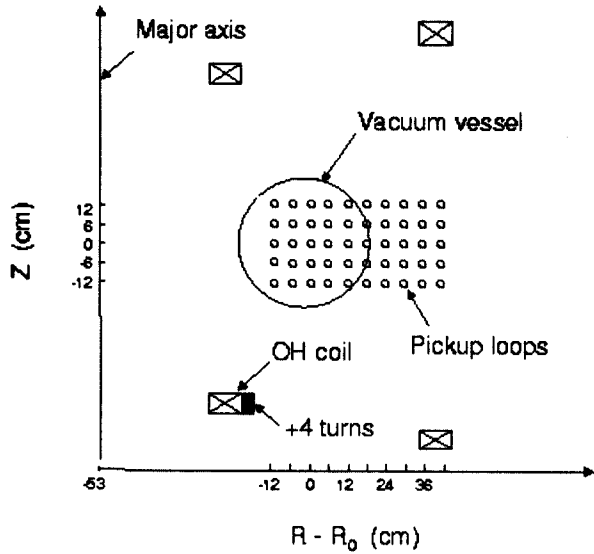


그림 3. 50채널 자기장 픽업루프 배치도.

틀 위에 전선을 감아서 제작하였으며, 길이와 지름은 각각 1 cm 이고 감은 수는 250이다. 그림에서 위-아래 네 개의 직사각형 모양은 저항가열코일의 위치를 나타낸다. 각각의 픽업루프는 저항가열코일에 전류가 흐르는 약 350 ms 동안 자기장 변화에 의한 유도전압을 측정하며, 측정된 신호는 적분기에 의해 시간에 따라 적분되어 자기장 값으로 환산된다. 저항가열코일에 의해 발생된 자기장은 진공용기를 통과하므로 자기장이 시간에 따라 급격히 변하는 시간구간에서는 진공용기에 와류전류(eddy current)가 흐르게 된다. 이러한 와류전류는 측정하기가 쉽지 않을 뿐 아니라 본 연구에서 필요로 하는 철심의 자기적 특성측정을 복잡하게 하므로, 와류전류의 효과를 피하기 위하여 저항가열코일에 흐르는 전류의 시간변화가 거의 없는 구간에서 자기장의 사상실험을 시도하였다.

그림 4는 저항가열코일에 의한 부유자기장의 Mod-B를 그린 것으로 그림에서 원점은 진공용기의 중심이며, 굵은 선은 진공용기를 나타낸다. 그림에서 보면 자기장 null의 위치가 진공용기 밖 아래쪽($R - R_0 = 25$ cm, $Z = -7$ cm)에 위치함

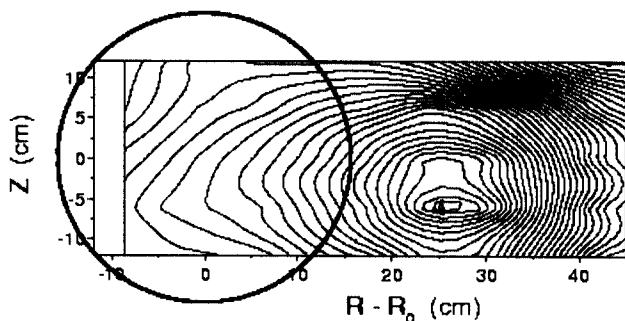


그림 4. 저항가열코일에 전류를 흘리고 자기장 픽업루프를 이용하여 얻은 진공자기장 사상 결과.

을 알 수 있는데, 이는 두 가지를 시사한다. 첫째, 자기장 null의 위치가 토카막 상하대칭면의 아래쪽에 위치하는 것으로 미루어 그림 2(b)가 보여주는 것처럼 철심의 자기적 성질이 상하 비대칭인 것을 보여주며, 둘째, 자기장 null의 위치가 진공용기 밖에 위치하는 것으로 보아 철심의 투자율이 설계치 보다 현저히 감소한 것을 알 수 있다.

따라서, 이러한 철심의 자기적 성질에 나타나는 상하 비대칭을 교정하기 위하여 그림 3에서와 같이 안쪽 아래 저항가열코일에 전선을 직렬로 네 번 더 감았다. 그런 뒤, 저항가열코일에 전류를 흘리고 부유자기장을 다시 측정하여 보니, 그림 5와 같이 자기장 null의 위치가 상하대칭면에 놓이며, 진공용기 내에서도 자기장의 상하대칭이 비교적 잘 이루어지게 되는 것을 확인할 수 있었다.

이렇게 자속루프를 이용한 자속 측정실험과 진공자기장의 사상실험을 통해, 철심의 투자율이 전체적으로 상당히 감소했을 뿐만 아니라, 토카막의 상하대칭면을 중심으로 아래-위 비대칭인 것이 발견되어 플라즈마의 생성 및 유지에 큰 장애가 되므로 철심의 투자율을 실험적으로 구해야 할 필요가 생기게 되었다.

III. Poisson 전산코드를 이용한 전산모사

Poisson 코드 [8]는 2차원 직각좌표계나 축대칭인 원통좌표계에서 자기물질(magnetic material)이 포함된 계산영역 내에서 맥스웰방정식을 풀어 전류원(current source)에 의해 발생하는 정자기장을 계산해 내는 전산코드이다. 실제 KAIST-TOKAMAK의 철심의 단면은 사각형 모양이나 Poisson 코드를 이용하기 위하여 단면적이 같은 원형으로 보고 토로이달 방향으로 대칭임을 가정하고 계산을 수행하였다. 철심의 단면모양을 사각형에서 같은 면적을 가지는 원형으로 고려했을 때의 반경을 유효반경이라고 하면 철심영역 I, II, III의 유효반경은 각각 21 cm, 14 cm, 21 cm가 된다(그림 6).

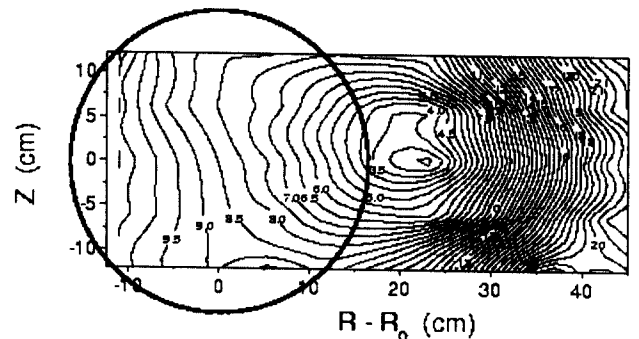


그림 5. 상하대칭을 개선하기 위해 저항가열코일의 하단 안쪽에 전선을 직렬로 4회 더 감고 자기장 사상을 한 후 얻은 Mod-B 등고선. 자기장 null의 위치가 상하대칭면에 놓임을 볼 수 있다.

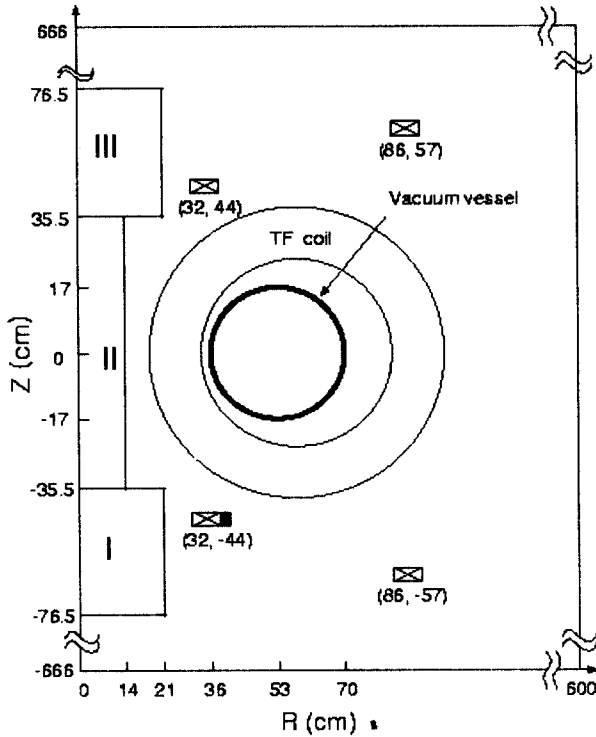


그림 6. 철심을 포함한 Poisson 코드 계산영역.

Poisson 코드를 이용하여 전산모사를 할 때 계산영역은 그림 6에서처럼 600×1332 cm로 철심의 높이나 저항가열코일의 반경보다 훨씬 크게 하였다. 경계조건으로는 자기력선이 경계면에 대해 평행한지 수직인지에 따라 Dirichlet 또는 Neumann 경계조건으로 나뉜다. 본 계산에서 경계조건은, 좌우 경계면에서는 자기력선이 경계면에 평행한 것이 주를 이루므로 Dirichlet 경계조건을 사용하였고 위-아래 경계면에서는 자기력선이 경계면에 평행한 것과 수직한 것이 섞여 있어서 경계조건에 영향을 받지 않을 정도로 확장된 경계면을 설정하였다. 앞 절에서 언급한 대로 철심의 자기적 성질이 상하 비대칭이므로 철심의 각 영역 I, II, III에서의 투자율을 서로 다른 값 $\mu_I, \mu_{II}, \mu_{III}$ 로 두고 계산을 수행하였다.

그림 7(a)는 이러한 조건하에서 철심의 투자율이 $\mu_I = \mu_{II} = \mu_{III} = 8000$ 일 때의 계산결과인데 플로이달 자속의 등고선 또는 자기력선을 나타낸다. 투자율이 8000 이상인 경우에도 자기력선은 그림 7(a)와 거의 같은 결과를 보여주었으며 μ 의 크기에 따라 큰 변화는 없었다. μ 가 8000 이하일 때에는 진공용기 중심부분의 x-point는 사라지고 진공용기 경계 쪽에 있는 null은 바깥으로 밀려나는 모습을 보였다. 투자율이 8000일 때 Mod-B 등고선은 그림 7(b)와 같으며 진공용기의 중심에 자기장 null이 위치해 있음을 알 수 있다. KAIST-TOKAMAK 제작 시 철심의 정확한 투자율은 불행히도 알려져 있지 않으나, 설계 시 저항가열코일에 의해 생성되는 플로이달 부유자기장 null의 위치가 진공용기의 중심에 오도록 저항가열코일의 위치와 철심의 크기가 결정되

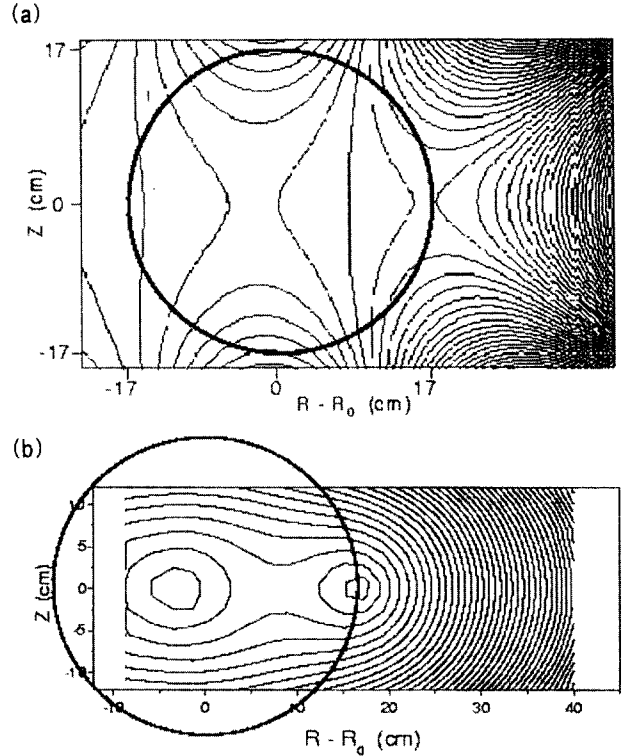


그림 7. 철심의 투자율이 8000일 때 Poisson 코드로 계산한 (a) 자속과 (b) Mod-B 등고선.

었다는 점을 고려하면 [7], 그림 7에 의해 철심의 설계 당시 투자율이 8000 정도임을 간접적으로 확인할 수 있었다. 또한 변압기 철심의 재료로 많이 사용되는 실리콘 스틸의 최대 투자율이 8000 정도 [9]라고 알려져 있으므로 여기서 구해진 $\mu=8000$ 은 철심 투자율의 설계치로 생각하기에 합당한 값이라고 판단된다.

IV. 자기장 사상 결과와 Poisson 코드 계산 결과의 비교

측정된 진공자기장의 사상 결과(그림 5)를 바탕으로, 세 부분으로 구성된 철심 각 영역의 투자율을 알아내기 위해 적당한 $\mu_I, \mu_{II}, \mu_{III}$ 값을 입력하여 Poisson 코드 계산을 수행하였다. 이때 저항가열코일의 전류는 417 A/turn으로 사상 실험에 사용된 값을 이용하였고, 투자율 값들을 변화시켜가면서 사상실험 결과와 비슷한 자기장 구조를 내는 투자율을 구하였다. 이렇게 결정된 철심의 투자율은 철심 각 영역에서 $\mu_I=60, \mu_{II}=400, \mu_{III}=400$ 이다.

그림 8(a)는 코드 계산의 결과로 자속의 등고선을 나타내며, 그림 8(b)는 그림 8(a)를 바탕으로 그린 Mod-B 등고선으로 자기장 null의 위치가 사상결과인 그림 5와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

그리고, 진공용기 근처 뿐 아니라 진공용기의 위쪽 여러 지

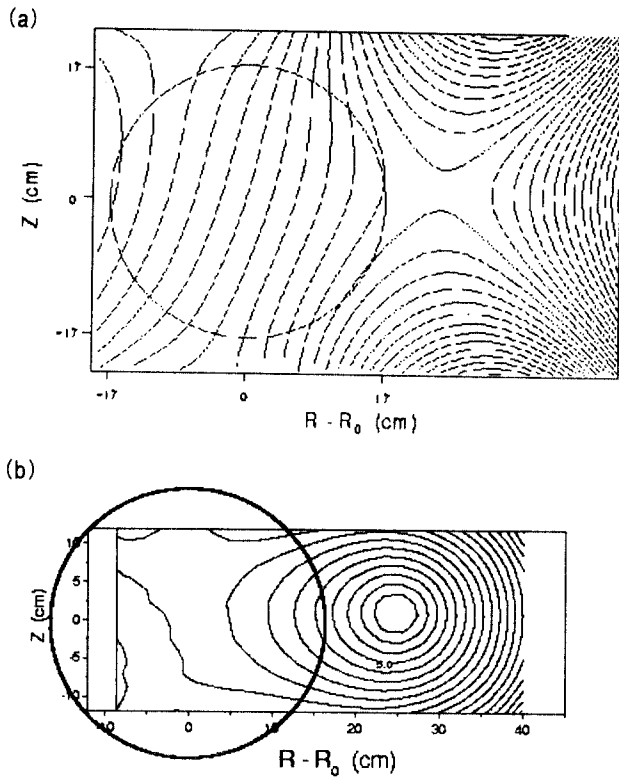


그림 8. 철심영역 I, II, III의 투자율이 각각 60, 400, 400일 때 Poisson 코드로 계산한 (a) 자속과 (b) 이때의 Mod-B 등고선.

침에서도 자기장 픽업루프를 이용하여 반경방향과 수직방향의 자기장 성분을 측정된 값과, 각 측정지점에서 Poisson 코드를 이용해 계산한 자기장을 표 1에 비교하였다. 철심단면을 원형으로 생각한 가정과 실험오차 등을 고려하면 측정치와 계산치가 그런 대로 잘 일치함을 볼 수 있다.

V. 철심 근처에서의 국지적 자기장 측정결과와 전산모사 결과와의 비교

진공자기장의 사상실험 결과와 전산모사 결과를 비교하여 구한 철심 세 부분의 투자율이 과연 정확하게 얻어진 값인지

표 1. 진공자기장 측정결과와 Poisson 코드 계산결과와의 비교.

R (±1 cm)	Z (±1 cm)	(B _R , B _Z , B) (G)	
		Measurement	Calculation
53	0	(0, 9, 9)	(0, 6, 6)
93	0	(0, 13, 13)	(0, 16, 16)
47	133	(53, 92, 106)	(57, 93, 109)
47	151	(31, 69, 76)	(35, 69, 77)
23	133	(30, 127, 131)	(37, 129, 134)
23	151	(17, 89, 91)	(21, 88, 91)

를 확인하기 위하여 철심의 세 부분 중 직접 접근이 가능한 I, III 영역에서 다음과 같은 실험을 수행하였다.

그림 9와 같이 투자율 값을 알고자 하는 위치에 반지름과 길이가 각각 1.5 cm이고 감은 수가 52인 솔레노이드 코일을 철심의 표면에 부착하고 코일에 전류를 흘려 외부자기장을 걸어준 뒤, 철심표면과 솔레노이드 코일의 바닥 면 사이에 가우스미터를 삽입하여 자기장을 측정하였다. 이렇게 측정된 값은 솔레노이드 코일전류에 의한 자기장과 이에 의해 철심이 추가적으로 만들어 내는 자기장의 합이 된다. 이렇게 측정된 자기장을 앞 절에서 구해진 I, III 영역에서의 투자율 값을 이용하여 Poisson 코드를 통해 구한 자기장과 비교해 보았다. 측정위치는 그림 10(a)에 그린 것처럼 철심영역 III의 경우 접근이 용이하여 철심의 가장자리 효과를 최소화할 수 있도록 윗면의 중앙에서 측정하였다. 그러나 영역 I의 경우, 토로이달 자기장 코일 및 토카막 구조물 때문에 접근하는데 한계가 있어 그림 10(b)와 같이 철심의 가장자리로부터 9 cm 되는 위치에 솔레노이드 코일을 위치시키고 실험을 수행하였다.

가우스미터 및 솔레노이드 코일의 보정을 위하여 코일에 2 A/turn의 전류를 흘리고 철심이 없는 곳에서 측정된 자기장은 표 2에서와 같이 29.0 G였으며, 이때 코드로 계산한 자기장의 세기는 28.5 G였다. 한편, 철심영역 III에서 측정된 자기장은 50.5 G였으며 계산치는 50.4 G로 아주 잘 일치하는

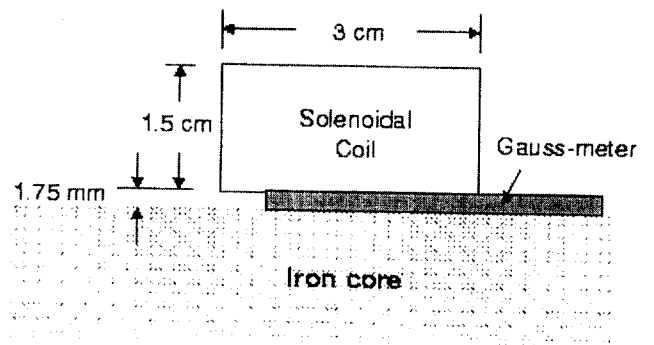


그림 9. 솔레노이드 코일과 가우스미터를 이용한 국지적 자기장 측정장치 개략도.

표 2. 슬레노이드 코일의 전류가 2A/turn일 때 가우스미터로 측정된 자기장 세기와 계산치.

	Vacuum	Segment I	Segment III
Measurement	29.0 G	49.0 G	50.5 G
Calculation	28.5 G	49.8 G with 60 cm core 49.7 G with 9 cm core	50.4 G

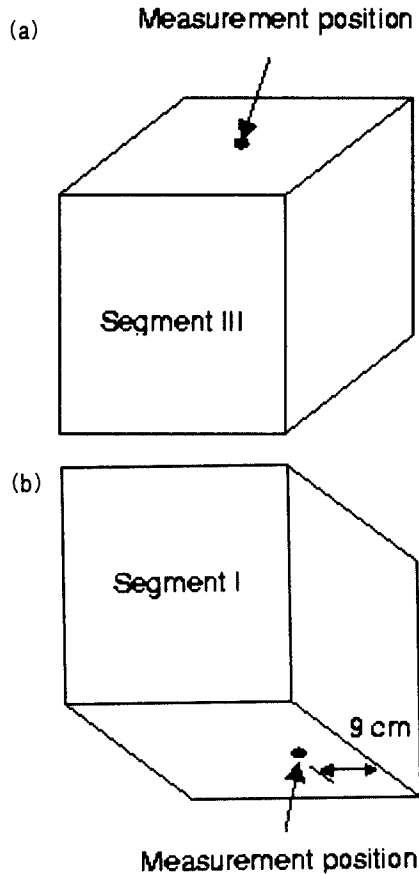


그림 10. (a) 철심영역 III 와 (b) I에서 국지적 자기장 측정 위치.

결과가 나왔다.

철심영역 I에서는 앞서 언급한 대로 철심의 가장자리로부터 9 cm되는 위치에서 자기장을 측정하여 보니 49.0 G였다. 한편, 이 경우 Poisson 코드를 이용하여 측정위치에서 자기장의 세기를 계산할 때에는 철심의 가장자리 효과 즉, 철심의 크기에 의한 효과를 고려해야 한다. 이를 위해 철심영역 I을 반지름이 9 cm인 실린더라 가정하고, 그 중심에서 자기장을 계산하여 보니 표 2에서와 같이 49.7 G가 되었다. 철심의 유효반경을 60 cm로 두고 계산하였을 때에도 자기장의 세기가 49.8 G인 것으로 보아 철심영역 I의 측정위치에서 철심의 가장자리 효과는 무시할 만 하였다. 표 1에서보다 측정치와 계산치사이의 오차가 훨씬 적은 이유는 슬레노이드 코일의 크기(1.5 cm)가 철심의 크기(21 cm)보다 아주 작아서 철심의 기하학적 구조에 의한 효과가 무시된 것으로 판단된다.

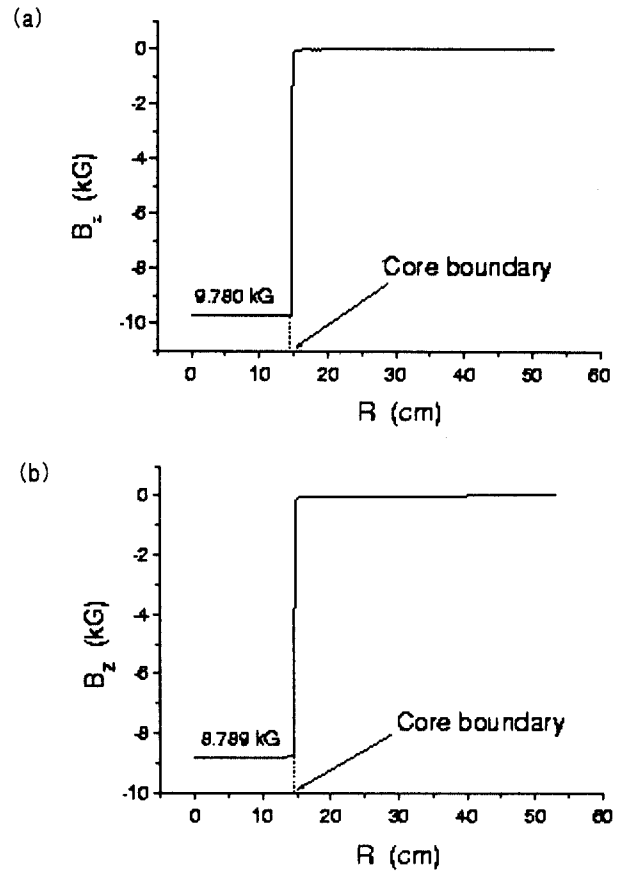


그림 11. (a) 철심의 투자율이 8000일 때, 그리고 (b) 철심영역 I, II, III의 투자율이 각각 60, 400, 400일 때 토카막 상 하대칭면에서 계산한 수직자기장(B_z)의 세기.

결론적으로, 표 2에서와 같이 슬레노이드 코일을 이용한 국지적인 자기장 측정결과와 철심영역 I, II, III의 투자율을 가지고 Poisson 코드를 이용한 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있었고, 이 사실로부터 Poisson 코드로 결정한 철심 각 영역의 투자율이 비교적 정확한 값을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

KAIST-TOKAMAK에서 플라즈마의 발생 및 제어에 중요한 역할을 하는 철심의 자기적 성질을 알아보기 위해 철심의 아래와 위 부분에 설치한 자속루프 신호와 진공자기장 사상실험 결과를 살펴보니, 철심의 투자율이 설계치보다 현저히 감소하였다는 사실을 확인할 수 있었다. 투자율 값을 알

기 위해 진공자기장 사상실험과 Poisson 전산코드 계산을 병행하여 얻은 두 결과를 비교하였으며 이로부터 세 부분으로 이루어진 철심의 투자율이 $\mu_I=60$, $\mu_{II}=400$, $\mu_{III}=400$ 임을 알았다.

이렇게 측정된 투자율의 신뢰성을 검증하기 위하여 철심으로 접근이 가능한 몇 위치에 작은 솔레노이드 코일로 국지적인 외부자기장을 만들고 이로 인해 자화된 철심이 추가적으로 만들어내는 자기장을 측정하였다. 이렇게 측정된 자기장 값은 진공자기장 사상과 Poisson 코드 계산의 비교로 결정된 투자율을 가지고 전산모사한 값과 비교하여 보니 거의 일치함을 알 수 있어, 사상실험과 전산모사 결과로 구한 철심의 투자율이 현재의 KAIST-TOKAMAK 철심의 자기적 상태를 비교적 잘 나타내고 있는 것으로 밝혀졌다.

개선된 진공자기장의 상하 대칭에 의해 초기 플라즈마의 제어가 한층 개선되었으며 이를 바탕으로 재현성 있는 평형상태의 고 전류 (<40 kA) 플라즈마가 만들어지고 있다. 그러나 여전히 자기장 null의 위치가 진공용기의 밖에 위치하고 있어 플라즈마의 초기 발생이 효율적이지 못할 것이라고 판단되어, 저항가열과외가 입력되어 절연과외가 일어나는 시점에 수직 및 수평자기장코일을 이용하여 진공용기의 중심에 자기장 null을 형성시켜, 이 자기장 구조가 초기 플라즈마의 성능과 어떤 상관관계가 있는지 현재 연구가 진행되고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국기초과학지원연구원의 Korea Supercon-

ducting Tokamak Advanced Research(KSTAR) 및 한빛 이용자육성사업, 그리고 두뇌한국21 (BK21) 사업의 지원 하에 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Gi-Chung Kwon, W. Choe and Jayhyun Kim *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 4188 (2000).
- [2] W. Choe, Gi-Chung Kwon and Junghee Kim *et al.*, Rev. Sci, Instrum. **71**, 2728 (2000).
- [3] 권기청, 김재현, 선창래 등, 새물리 **41**, 137 (2000).
- [4] R. D. Bengtson, Private communications (2000).
- [5] R. M. White, *Quantum Theory of Magnetism*, 2nd corrected and updated ed (Springer-Verlag, Berlin, 1983).
- [6] Soshin Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, 2nd ed (Oxford University Press, New York, 1972).
- [7] J. F. Benesch, R. D. Bengtson, G. L. Cardwell, S. A. Eckstrand, R. F. Gandy and P. Wildi, Nuclear Technology/Fusion **2**, 398 (1982).
- [8] J. H. Billen and L. M. Young, Poisson/Superfish, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-96-1834 (1997).
- [9] *American Institute of Physics Handbook* (Third edition, McGraw-Hill, New York, 1972).

Magnetic Permeability Determination for the KAIST-TOKAMAK Iron Core Transformer

T. S. LEE, Sang-Jean JEON, Songwhe HUH, G. S. EOM, Jayhyun KIM,
Seongchong PARK, Sey-Yon MOON and W. CHOE

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon 305-701

(Received 9 April 2001)

In a tokamak with an iron-core transformer, the magnetic field configuration is significantly different from that in a tokamak with an air core. If the effect of the iron core on plasma start-up, equilibrium, etc, is to be examined, knowledge of the magnetic properties of the iron core is required. Thus, the magnetic permeability of the KAIST-TOKAMAK iron core was investigated by incorporating the results of vacuum magnetic field mapping using the 50-channel magnetic pickup loop array and numerical simulation using a Poisson code. Measurement of the local magnetic field beside the iron core segments and the numerical calculation demonstrated good agreement. From this, we verified that the magnetic permeabilities obtained by the vacuum field mapping and by the code simulation were in reasonable agreement.