

토카막 플라즈마 발생 조건 및 자기 진단

김재현, 박준교, 이상곤
국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

1. 토카막 플라즈마 발생 조건

자기장을 사용해 고온 플라즈마를 감금시키는 토카막 핵융합 장치에서는 중성기체에서 플라즈마로 전리되는 속도와 감금 상태에서 벗어나 다시 중성기체로 되돌아가는 속도 사이의 비율에 따라 플라즈마가 발생하거나 소멸하게 된다. 정상상태 (steady state)에 이른 플라즈마나 초기 방전상태 (start-up state)에 있는 플라즈마나 기본적으로 두 현상 사이의 관계에 따라 전자 밀도, 전자 온도 등의 플라즈마 변수들이 시간의 함수로 바뀌게 된다.

먼저 토카막 진공용기 안에서 플라즈마가 생성되는 원리는 다음과 같다. 토러스 형태의 진공용기 내부를 따라 외부의 폴로이달 자기장 코일 (poloidal field coil)에서 변압기 기작 (transformer action)에 따라 일주전압 (loop voltage)가 유도된다. 유도된 일주전압은 진공용기 내부에 존재하는 씨앗전자 (seed electron)를 가속시켜 중성기체와 충돌시킴으로써 중성기체를 이온과 전자로 전리시키는 일련의 증폭과정 (avalanche process)을 일으키게 된다.

KSTAR나 ITER 같은 초전도 토카막 장치에서는 상대적으로 빠른 응답이 용이하지 않은 초전도 코일의 안정성 측면에서 일주전압을 올리는데 많은 제약이 따르게 된다. 이에 대한 대안으로 전자공명주파수 대역의 전자기파를 사용해 초기 씨앗전자를 미리 증폭시키는 전이온화 기술이 활발하게 연구되고 있다.

한편 생성된 플라즈마를 효과적으로 감금시키는 일은 플라즈마 발생 조건의 다른 한축을 이루게 된다. 통상적으로 토카막 플라즈마는 토로이달 코일에 흐르는 전류가 만들어내는 토로이달 자기장 (toroidal field)와 플라즈마 전류 자체가 만들어내는 폴로이달 자기장 (poloidal field)이 함께 만들어내는 에르고딕 자기장면 (ergodic surface) 위에 감금된다.

문제는 토로이달 자기장의 경우 초전도 토카막 장치에서는 원하는 시간 동안 전원장치를 통해 일정하게 발생시키는 일이 가능한 반면 폴로이달 자기장은 플라즈마 전류에 비례해 발생되기 때문에 플라즈마 전류가 막 올라가기 시작하는 초기 방전상태에서는 플라즈마를 감금시키기에 충분한 폴로이달 자기장을 만드는 일이 불가능하다.

▶ 토카막 장치 내부의 자기력선 합성

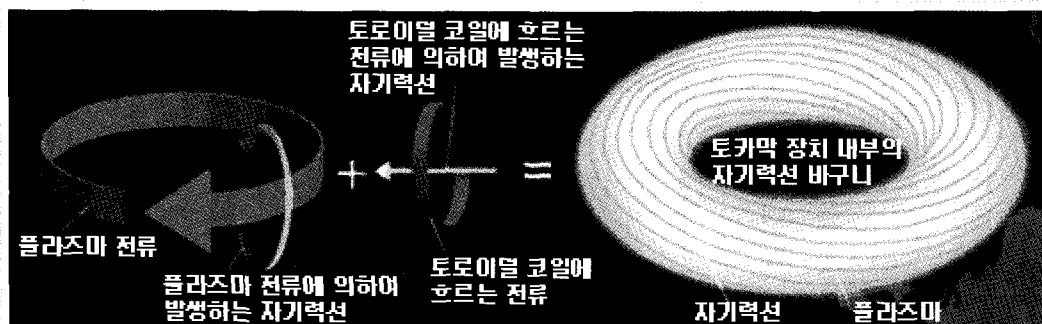


그림 1. 토카막 장치에서 플라즈마를 감금시키기 위해 필요한 자기력선 구조.

이와 같은 타운젠트 전자쇄도 (Townsend avalanche) 증폭과정은 당연히 외부에서 가해지는 일주전압이 셀수록 활발하게 일어나는데

따라서 초기 방전상태에서는 플라즈마 전류가 상승해 에르고딕 자기장면이 만들어지기 전까지 플라즈마의 감금을 토로이달 자기장에 주

로 의존하게 된다. 실제 초기 플라즈마 방전 상황에서는 순수한 토로이달 자기장뿐만 아니라 주변 폴로이달 코일에 흐르는 전류나 진공용기에 유도된 와전류가 만들어내는, 토로이달 자기장에 수직한 표류 자기장이 존재한다. 결과적으로 토로이달 자기장에 표류 자기장이 더해져 진공용기 벽면을 향하는 개방 자력선 (open field line) 구조가 만들어지게 된다. 생성된 플라즈마는 초기 방전상황에서 개방 자력선을 따라 진공용기 벽면으로 손실되는데 손실 속도를 줄이기 위해서는 표류 자기장 크기를 최소로 만들어야 한다.

통한 일주전압 생성의 측면에서는 초기 플라즈마 발생 시점에 충분한 자속을 확보할 필요가 있다. 따라서 외부 폴로이달 코일전류들의 조합을 통해 플라즈마 발생지점 (KSTAR의 경우 $R=1.8\text{ m}$, $Z=0.0\text{ m}$) 근처에서 생성되는 자기장들이 서로 상쇄되도록 만들어 표류 자기장을 억제하는 방식을 택하게 된다.

KSTAR 최초 플라즈마 발생 실험에서는 두 가지 형태의 초기 인가전류 조합을 시험했는데, 그림 2의 (a)에 나와 있는 통상적인 운전모드에 가까운 조합과 (b)에 나와 있는 쌍극자 운전모드 조합이다. 대부분의 토카막 장

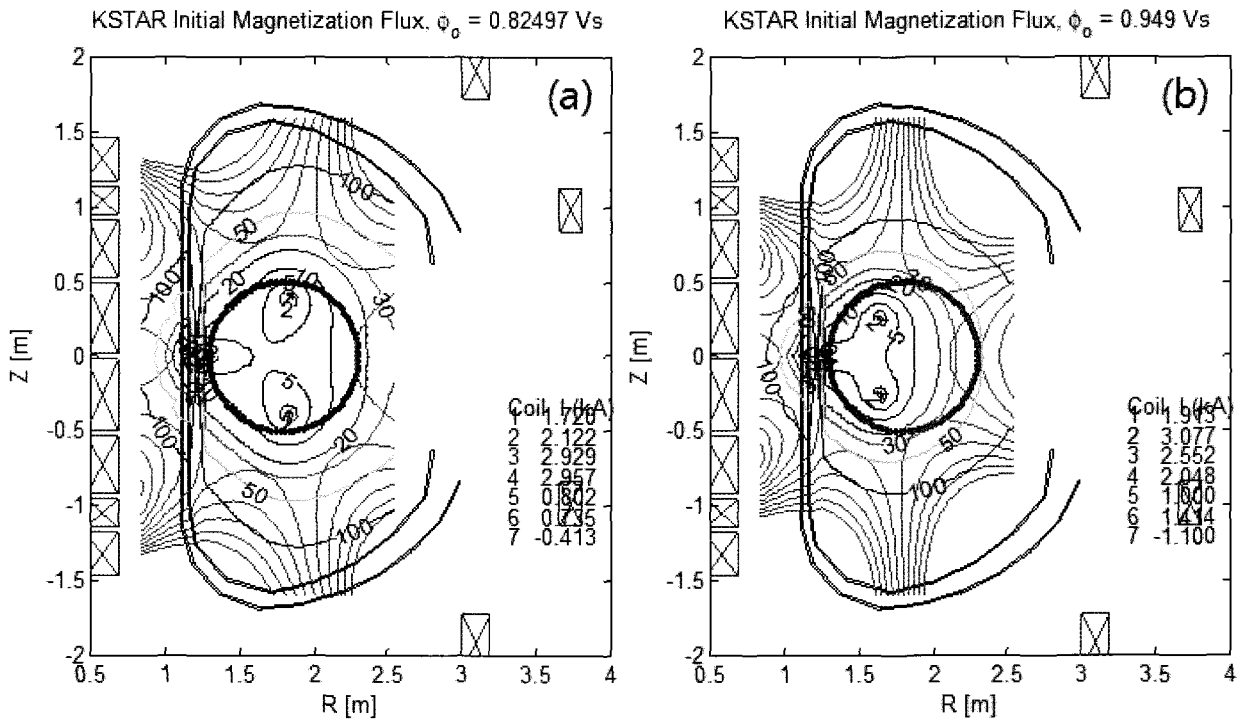


그림 2. 초기 플라즈마 발생시점에서 진공용기 내부에 생기는 표류 자기장을 외부 폴로이달 코일에 인가되는 전류들의 조합을 통해 제어한 결과. (a) 안쪽에 있는 솔레노이드 코일에 주로 전류를 인가해 자속을 확보하는 통상적인 운전모드 (conventional operation mode). (b) 보다 큰 자속을 확보하기 위해 바깥쪽에 있는 폴로이달 코일들에도 전류를 인가하는 쌍극자 운전모드 (dipole operation mode).

2. KSTAR 최초 플라즈마 발생 조건

그림 2는 2008년 KSTAR 최초 플라즈마 발생 실험 동안 외부 폴로이달 코일의 전류를 조합해 진공용기 내부에 표류 자기장이 없는 영역이 최대가 되도록 만든 모습이다. 사실 표류 자기장을 없애기 위해서는 외부 폴로이달 코일들에 아무런 전류도 인가하지 않는 것이 가장 간단한 해가 된다. 하지만 자속변화를

치는 플라즈마 발생시점에 토러스 중심부에 일렬로 배치된 솔레노이드 형태의 코일에만 전류를 인가함으로써 솔레노이드 바깥에 위치한 진공용기에는 오직 자속만 존재하고 자기장은 존재하지 않는 플라즈마 발생 방식을 취하는 것이 일반적이다. 이런 방식은 공학적인 제약조건이 없다면 이상적인 형태라 할 수 있지만 일주전압 생성에 필요한 급격한 자속변화를 오로지 협소한 토러스 중심부 공간에 위

치한 솔레노이드 코일이 도말아야 하고, 바깥쪽 밀림 현상 제어에 필요한 수직 자기장을 만들어내기 위해 인덕터스가 큰 바깥쪽 폴로이달 코일들에 흐르는 전류를 빠르게 변화시켜야 하는 몇 가지 난점이 존재한다.

생성되는 속도뿐만 아니라 생성된 플라즈마가 다시 진공용기 벽면으로 빠져나가는 속도에도 크게 영향 받기 때문에 낮은 표류 자기장 단면을 가지는 통상적인 운전모드가 플라즈마 발생 초기에는 더 빠른 플라즈마 생성 속도를

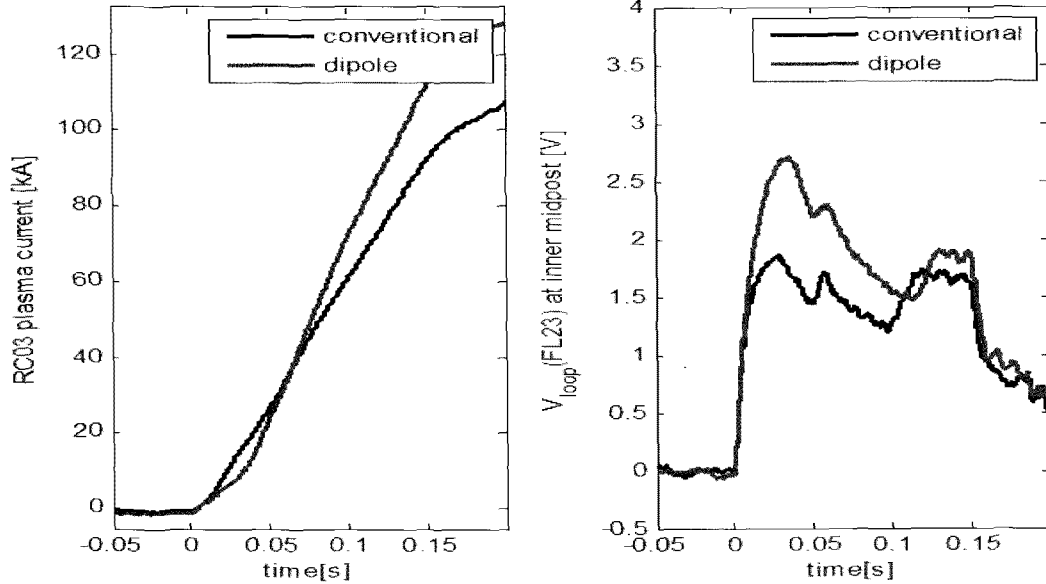


그림 3. 플라즈마 전류 상승과 일주전압의 시간변화. 통상적인 운전모드 (흑색선)와 쌍극자 운전모드(적색선).

이에 대한 대안으로 바깥쪽에 위치한 폴로이달 자기장 코일에도 미리 전류를 인가함으로써 순간적인 저항연결 (blip resistor connection)을 통해 코일 전류 변화에 필요한 전원장치 사양 등의 요구조건을 완화하는 방식이 그림 (b)에 나온 쌍극자 운전모드이다.

그림 3에 나온 바와 같이 이런 쌍극자 운전모드를 사용함으로써 KSTAR 초기 플라즈마 발생실험에서는 통상적인 운전모드에 비해 더 높은 일주전압과 더 빠른 플라즈마 전류 상승을 얻을 수 있었다. 반면 쌍극자 운전모드가 통상적인 운전모드와 비교해 불리한 점도 존재한다. 그림 3을 자세히 살펴보면 통상적인 운전모드가 쌍극자 운전모드에 비해 낮은 일주전압에도 불구하고 초기 플라즈마 전류상승은 오히려 더 빠르게 나타남을 알 수 있다. 이는 그림 2에 보이는 것처럼 통상적인 운전모드가 쌍극자 운전모드에 비해 더 낮은 표류 자기장 세기 단면을 가지기 때문이다.

글머리에 언급한 것처럼 실제 플라즈마 발생 속도는 단순히 중성기체에서 플라즈마가

보이게 된다.

3. 그밖의 토카막 플라즈마 발생 조건들

지금까지 설명은 주로 전자기 유도를 통한 플라즈마 생성 원리에만 초점을 맞추어 설명했지만 실제 플라즈마 발생에는 플라즈마 현상 자체를 지배하는 다양한 조건들이 존재하게 된다.

예를 들면 타운젠트 전자쇄도에 있어 일주전압만큼 중요한 요소인 중성기체 충전압력에 따라 플라즈마 발생 속도 자체가 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 발생 자체가 실패하는 경우도 생긴다. 이외에도 불순물에 의한 에너지 방사효과 등 성공적인 플라즈마 발생을 위해 고려해야 할 많은 문제들이 있지만 더 이상의 설명은 이 글의 범위를 넘어가므로 이만 줄일까 한다. 토카막 플라즈마 발생에 대해 더 자세하게 알고 싶으신 분은 참고 문헌 [1]을 살펴보시길 권한다.

4. 자기적 진단계

KSTAR 장치는 자기장에 의하여 플라즈마를 구속하는 토카막 장치이므로, 플라즈마 내의 물리현상을 연구하기 위해서는 자기장 진단이 필요하다. 이에 KSTAR 장치에서 플라즈마 진단을 위한 자기적 진단계를 소개하기로 한다. KSTAR 자기적 진단계는 센서와 적분기를 포함한 신호처리계통으로 구성된다. 센서는 코일 혹은 루프형태이며, 시간적으로 변하는 자속에 의해 센서 양 끝단에 유도되는 전압을 시간적으로 적분함으로써 자속값을 측정하게 된다. 자기적 진단 센서는 그림 4와 같이 9 종류의 센서로 구성된다. 용기전류 모니터를 제외한 자기적 진단센서는 측정상 정확도를 높이기 위하여 KSTAR 진공용기 내부에 설치하도록 설계 되었다.[2]

플라즈마의 평형상태 물리량을 측정하여 플라즈마 모양 및 위치를 진단하기 위한 센서들은 아래에 언급하였으며, 측정값은 플라즈마 재생성(reconstruction)을 위한 데이터로 사용된다.

로콥스키 코일은 플라즈마를 폴로이달 방향으로 감싸고 있어 플라즈마 전류량을 측정한다. 용기전류 모니터는 진공용기 외벽을 폴로이달 방향으로 감싸고 있어 플라즈마 전류와 용기에 흐르는 전류를 측정한다. 두 센서의 측정값으로 용기 전류를 진단할 수 있다. 플

럭스 루프는 톨로이달 루프로 진공용기 내의 폴로이달 자속량 혹은 플라즈마 발생과 관련된 일주 전압을 측정한다. 자장탐침은 플라즈마 언저리(edge)영역에서 폴로이달 자장값을 측정하는 데, 보통 폴로이달 어레이 형태로 폴로이달 자장값 분포를 알 수 있게 된다. 세들 루프는 토카막 장치 내에서 포트 때문에 톨로이달 방향으로 완전히 한 바퀴 감쌀 수 없는 용기내벽에서의 부분적인 폴로이달 자속을 측정한다. 반자성루프는 플라즈마를 감싸고 있는 한 쌍의 폴로이달 루프로 톨로이달 자장 하에서 발생된 플라즈마에 의한 반자성 자속량을 측정한다.

자기 유체학적 불안정성(MHD instability) 현상 및 플라즈마 붕괴와 관련된 현상 진단을 위한 센서들은 아래에 기술하였다.

미르노프 코일은 플라즈마 언저리영역에서 자장 섭동량을 측정한다. 보통은 톨로이달 및 폴로이달 어레이 형태로 섭동량의 주파수 특성 및 공간적인 특성을 진단하게 된다. 록모드 코일은 진공용기포트 주변에 설치한 루프로 자장값을 측정하여 외부 에러 자장에 의하여 발생하는 플라즈마 모드의 로킹 현상을 진단한다. 할로우 (halo) 전류 모니터는 수직 위치 이동 현상(Vertical Displacement Event, VDE)에 의한 플라즈마 붕괴시 플라즈마 대향 (plasma facing component) 지지 구조물을 따라 흐르게 되는 할로우 전류를

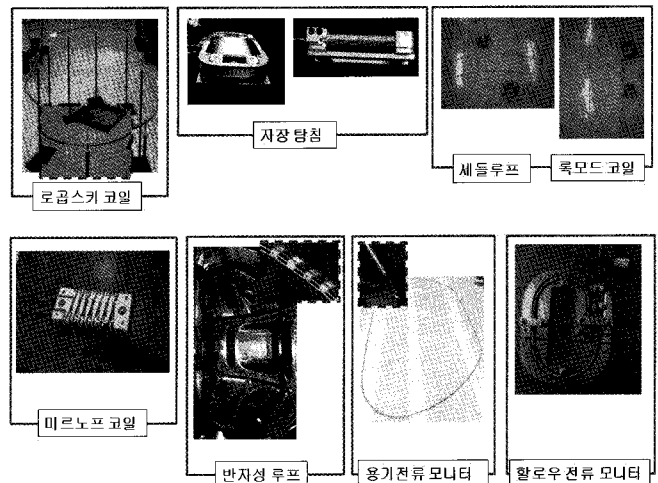
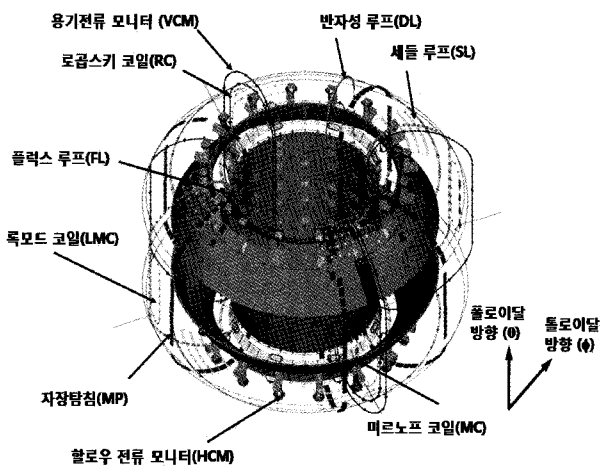


그림 4. KSTAR 장치에서 자기적 진단센서(왼쪽), 제작된 KSTAR 자기적 진단센서들(오른쪽, 플럭스 루프제외). 미르노프 코일은 주파수 특성을 고려하여 세라믹 블럭에 구리 나선을 감아 제작함.

측정한다. 이 전류와 톨로이달 자장에 의한 자기장력이 장치의 기계적 안정성에 미치는 영향을 연구하는 데 기본 데이터로 이용된다.

이상에서 언급한 KSTAR 자기적 진단 센서의 대부분은 고온 및 고진공 환경 조건에 적합한 외피가 스테인레스 스틸인 MgO 동축 케이블을 사용하여 제작하였다.[3] 여기서 코일 혹은 루프 형태로 케이블을 감은 후에 한 쌍의 케이블을 트위스팅하여 신호선으로 이용한다. 그래서 센서와 신호선간에 특별한 연결용 부품이 필요 없다. 제작된 센서들은 그림 4의 오른쪽과 같다.

제작된 자기적 진단센서에 대한 성능은 고온 및 고진공하에서 자기장 측정 시험에서 검증하였고[3,4], 이와 함께 정확한 자기장 측정을 위해 필요한 센서 별 calibration 작업 [5,6]을 수행하여 표 1과 같은 결과를 얻었다.

표 1. 자기적 진단 센서별 calibration 결과

자기적 진단 센서	calibration factor
로콥스키 코일	$k = 8.22 \times 10^{-8} \text{ [Vs/A]}$
용기전류 모니터	$k = 4.15 \times 10^{-8} \text{ [Vs/A]}$
자장 탐침	$NA = 6.0 \times 10^{-2} \text{ [m}^2\text{]}$
	$NA = 1.07 \times 10^{-2} \text{ [m}^2\text{]}$
반자성 루프	루프간 면적비 = 1.038
할로우 전류모니터	$k = 3.46 \times 10^{-8} \text{ [Vs/A]}$

자기적 진단용 적분기는 PC로 제어하며, 시간 적분시 발생하는 드리프트를 자동적으로 보상하는 아날로그 타입을 사용하였다.[6] 자기적 진단계의 구성은 그림 5와 같다

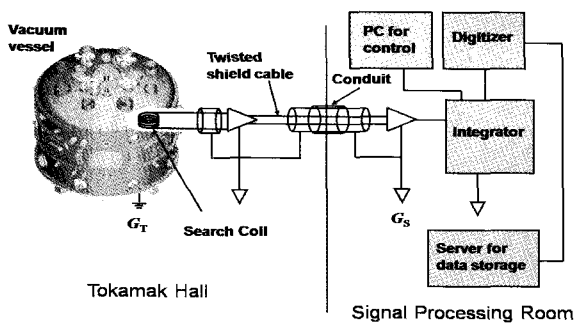


그림 5. 자기적 진단계 구성도.

5. 초기 플라즈마 진단용 센서 설치

제작된 센서 중에 초기 플라즈마 진단을 위해서 로콥스키 코일과 용기전류모니터, 플러

스 루프, 자장탐침, 반자성루프를 KSTAR 진공용기 내외벽에 그림 6의 왼쪽과 같은 과정을 거쳐 설치하였다. 모든 센서가 진공내 설치되므로 센서로부터 신호를 이송하기 위해서는 시작품의 성능시험을 성공적으로 마친 브레이징 방식을 사용한 진공용 연결단자를 사용하였다.[3] 또한 설치된 센서의 설치오차는 1mm 이내임을 그림 6의 오른쪽에 보인 레이저 트랙커 시스템을 이용한 3차원 정밀 측정으로 확인하였다.[5]

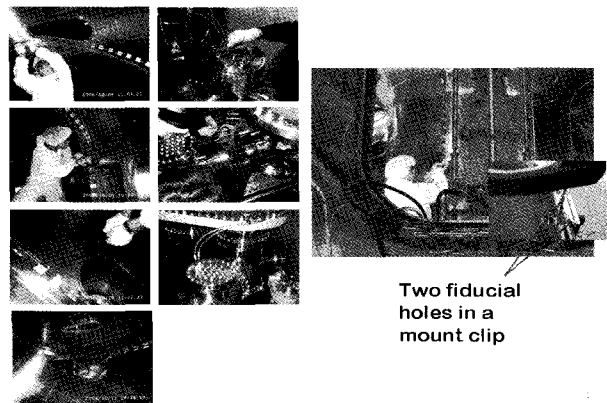


그림 6. 반자성루프 설치과정 및 설치 후 정밀 위치 측정.

6. KSTAR 초기 플라즈마의 자기 진단

초기 플라즈마 발생 실험에서 자기적 진단 센서로 그림 7에 보인 플라즈마 전류와 용기 전류, 일주전압, 반자성자속, 톨로이달 자속 및 자기장 등 물리량을 측정하였다.[7]

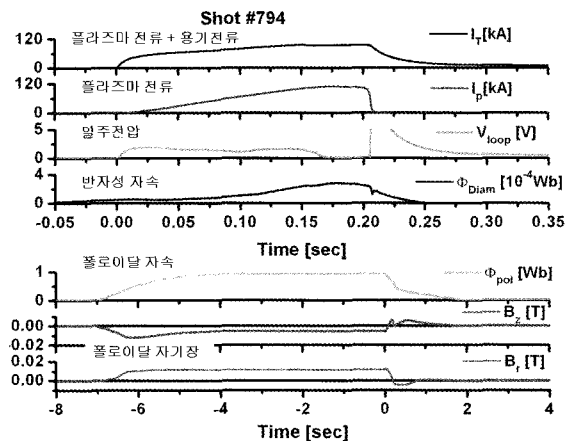


그림 7. 초기 자기적 진단센서로 측정된 플라즈마 물리량.

측정한 자기적 진단데이터를 이용하여 계산한 플라즈마 단면의 재생성(reconstruction) 결과는 그림 8과 같았으며, 플라즈마 발생 중 고속 카메라로 촬영한 이미지와 비교할 때 큰 차이가 없었다.

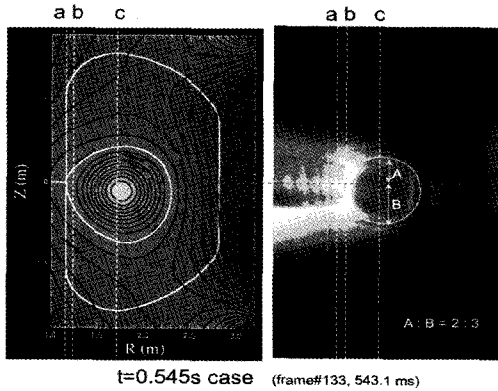


그림 8. 재생성(reconstruction)된 플라즈마 단면과 고속 카메라 이미지 비교 (shot #1127). 여기서 a는 반경이 1.16 m(용기내벽)이며, b는 반경이 1.26 m이고 c는 반경이 1.7 m이다 [8].

7. 앞으로의 자기 진단 계획

플라즈마 평형상태에 대한 보다 정확한 자기적 진단을 위하여 자장탐침 및 플럭스 루프를 추가적으로 설치할 것이며, 초기 플라즈마 실험에서 보인 신호 계통의 보완사항을 개선을 통하여 플라즈마 위치 제어에 필요한 진단 데이터를 제공할 것이다. 이와 더불어 미르노 프코일 및 할로우 전류 모니터 등 센서를 설치하여 플라즈마내의 MHD 현상 및 플라즈마 붕괴 연구를 위한 진단도 진행할 것이다.

참고문헌

[1] "Tokamak Start-up", Heinz Knoepfel 편집, Plenum press.
 [2] S. G. Lee and J. G. Bak, "Magnetic diagnostics for Korea superconducting tokamak advanced research", Rev. Sci. Instrum., 72 pp 439-441 (2001).
 [3] J.G. Bak, S.G. Lee, "Performance test of sample coils in the Korea superconducting tokamak advanced

research magnetic diagnostic test chamber", Rev. Sci. Instrum., 72 pp 435-438 (2001).

[4] J.G. Bak, S.G. Lee and D. Son, "Performance of the magnetic sensor and the integrator for the KSTAR magnetic diagnostics", Rev. Sci. Instrum., 75 pp 4305-4307 (2004).

[5] S.G. Lee and J.G. Bak, "Fabrication details, calibrations, and installation activities for Korea superconducting tokamak advanced research", Rev. Sci. Instrum., 77 pp 10E306-1 - 10E306-3 (2006).

[6] J.G. Bak, S.G. Lee and E.M. Ka, "Diamagnetic loop for the first plasma in the KSTAR machine", Rev. Sci. Instrum., 79 pp 10F118-1 - 10F118-4 (2008).

[7] S.G. Lee, J.G. Bak, E.M. Ka, J.H. Kim, S.H. Hahn "Magnetic diagnostics for the first plasma operation in Korea superconducting tokamak advanced research", Rev. Sci. Instrum., 79 pp 10F117-1-10F118-3 (2008).

[8] O. Katsuro-Hopkins, S.A. Sabbagh, J.M. Bialek, H.K. Park, K.I. You, S.G. Lee, J.G. Bak, S.W. Yoon, J.H. Kim, J.Y. Kim, A.H. Glasser, L.L. Lao, "KSTAR first plasma equilibrium reconstruction and study of global MHD stability control", 50th APS DPP meeting, Dallas, Texas, USA, November 17-21 (2008).

저자이력



김재현(金在賢)
 2005년 한국과학기술원 물리학 박사, 2006-2007년 미국 Far-Tech Inc. 근무, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR운영사업단 선임연구원
 (jayhyunkim@nfri.re.kr)



박준교(朴俊敎)

1996년 서울대 원자핵공학과
공학박사, 현재 국가핵융합연
구소 KSTAR운영사업단 책임
연구원 (jgbak@nfri.re.kr)



이상곤(李相坤)

1994년 위스콘신주립대 플라
즈마물리학박사, 현재 국가핵
융합연구소 KSTAR운영사업
단 책임연구원
(sglee@nfri.re.kr)