

KT-1 장치에서 언저리(edge) 플라즈마의 특성

박준교, 정승호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

KT(KAERI Tokamak)-1 장치의 언저리 영역에서 삼중정전탐침을 이용하여 플라즈마밀도, 전자온도 및 부유(floating)전압을 측정하였다. 토카막 방전조건에 따라 고정된 위치에서의 측정값들은 시간에 대한 변화를 보였다. 특히 플라즈마 밀도 값 $\langle n_e \rangle$ 은 약 두 배까지의 시간에 따른 변화 폭을 보였다. 반면에 밀도 섭동량(fluctuation) $\delta n_e / \langle n_e \rangle$ 은 다른 섭동량과 마찬가지로 거의 일정한 값을 나타냈다. z 방향에 대해 측정한 profile 결과는 모두 z/a 에 따라 감소하였으며, 반면에 섭동량은 증가하는 경향을 나타냈다. 부유전압 및 압력구배에 의하여 발생하는 poloidal 방향의 drift속도를 profile 결과로부터 얻었으며, 언저리 영역에서 섭동량은 이온 diamagnetic 방향으로 최대 $+2 \times 10^5$ cm/sec의 속도로 이동함을 예상할 수 있었다. 섭동량 자체에 의해 유기되는 전기장 \vec{E}_r 로부터, 반경방향으로 이동되는 속도는 측정한 부유전압의 섭동량에 대한 z 방향 profile로부터 언저리 영역에서 \tilde{v}_r 가 최대 $+1.2 \times 10^5$ cm/sec가 됨을 알 수 있었다. 언저리 영역에서 섭동량이 장치 벽쪽으로 이동하는 정도를 진행 속도 값으로부터 예상할 수 있었다.

1. 서론

언저리 플라즈마는 토카막방전시 발생된 플라즈마(core plasma)와 벽과 사이에 존재하며, 벽과 플라즈마간의 반응에 의한 여러 현상이 발생하는 일종의 경계 영역에 해당된다.¹ 언저리 플라즈마의 특성을 이해하는 것이 토카막과 같은 자장 가둠(confinement) 플라즈마장치에서 입자 및 에너지 가둠을 기술하는 데 필수적이다. 현재까지 여러 토카막장치에서 자장 가둠에 관련된 입자 수송(transport)량을 기술하기 위한 연구가 상당히 진행되어 왔다. 특히 언저리 영역에서 저주파수 대역($\omega \ll \omega_{ci}$)의 플라즈마 섭동량(fluctuation)에 대한 실험 및 이론적 기술과 관련된 연구는 아직도 여러 편의 논문을 통해 발표되고 있으며, 진행중이다.^{2,3,4} 이러한 연구에도 불구하고 아직 토카막 플라즈마에서 관측된 'anomalous' 수송(transport)에 대한 섭동량의 역할에 대한 연구가 아직 남아 있다.²

본 연구에서는 토카막장치인 KT-1에서 언저리 영역의 플라즈마 밀도, 전자온도 및 부유전압을

삼중정전탐침으로 측정하여 이들의 시간적 특성을 조사하였다. 영역 내에서 얻은 측정값의 profile로부터 압력구배와 전기장을 구하여, 섭동량의 poloidal 방향으로 drift 정도를 파악하였다. 또한 측정된 저주파수 대역의 섭동량 자체에 의해 야기되는 \vec{E}_\perp 를 계산하여, 반경방향 이동속도를 구하고, 입자수송과 관련하여 토카막장치의 언저리 영역 내에서 플라스마 섭동량의 이동에 대한 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험 장치

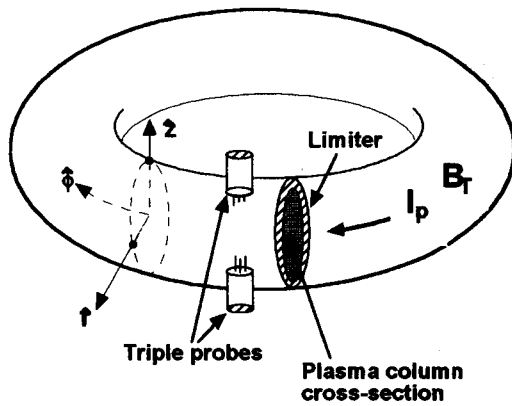


Fig. 1. View of triple probes mounted on the KT-1 device.

KT-1 장치는 소형 토카막으로 주 반경(major radius)은 $R_0 = 27$ cm이고 부반경(minor radius)은 $a = 5$ cm이다. 원형 링모양의 탄소 리미터(내경 4 cm, 외경 5 cm)를 토카막 용기 내부에 4개를 설치하였다. 토카막 플라스마 방전 시에 토로이달 자장은 $B_T \sim 0.8$ T이고, 플라스마 전류는 $I_p \sim 5$ kA이었다. 플라스마 방전유지시간은 약 18 msec 정도였다. 장치의 벽에 의한 플라스마 영향을 최소화하기 위해 주기적으로 RF에 의한 glow 방전 세정을 실시한다. 플라스마밀도, 전자온도 등의 기본변수들은 플라스마 전류가 평활한 영역인 방전 개시후 약 3 msec 시점에서부터 일정 시간 내에서 측정하였다.

플라스마를 진단하기 위하여 두 개의 삼중정전탐침을 이용하였다.⁵ 이들은 그림 1에서 보듯이 장치의 위 아래 설치하여, 방전 shot 들 사이에 z 방향으로 이동하도록 하였다. 이들 탐침들은 세 개 tip으로 구성하였고, 재료는 탄탈륨 선으로, 직경이 0.5 mm이고 길이는 3 mm이었다. 세 개의 tip들간의 간격은 약 2~3 mm이었다. 세 개의 tip에서 측정된 신호인 이온포화전류량, 부유전압량, 두 tip의 전압 차는 isolation amplifier를 거쳐 플라스마밀도, 전자온도로 처리하였다.⁶

3. 언저리(edge) 플라스마의 특성

1) 플라스마 밀도, 전자온도, 부유전압의 시간적 특성

KT-1 장치에서 토카막 방전으로 얻는 전형적인 예는 그림 2와 같다. 그림 2(a)~(b)는 각각 토카막 방전 시에 나타나는 루우프 전압과 플라스마 전류이고, 그림 2(c)는 플라스마 내부와 언저리에서 방출되는 H_α -선량을 측정한 결과이다. 그림 2(d)~(f)는 삼중 정전 탐침을 장치 벽에서 1.5 cm 떨어진 지점($z/a \sim 0.7$)에 고정하고 전자온도 kT_e 와 플라스마밀도 n_e 와 부유전압 V_f 을

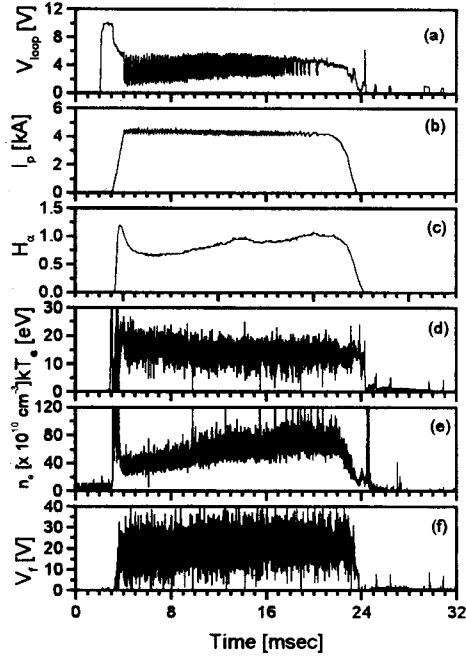


Fig. 3. Time evolution of bulk and edge plasma parameters, where V_{loop} , I_p and H_α are the loop voltage, plasma current and H_α radiation, respectively. kT_e , n_e and V_f are the edge plasma temperature, density and floating potential, measured with triple probe, respectively

소하였다. 이는 토카막방전의 장치 벽과 플라즈마간의 반응에 의한 효과로 플라즈마 밀도가 변한 것으로 생각된다. 일종의 방전세정효과로 점차 H_α 선량이 줄어든 것이다. 방전 세정 전에는 토카막방전시

장치 벽으로부터 효과에 의해, 타 논문⁷에서 보인 fuelling에 의한 것처럼 시간에 따라 $\langle n_e \rangle$ 의 증가를 보였고, 방전세정 후에는 장치 벽으로부터 효과가 미미하여 토카막방전

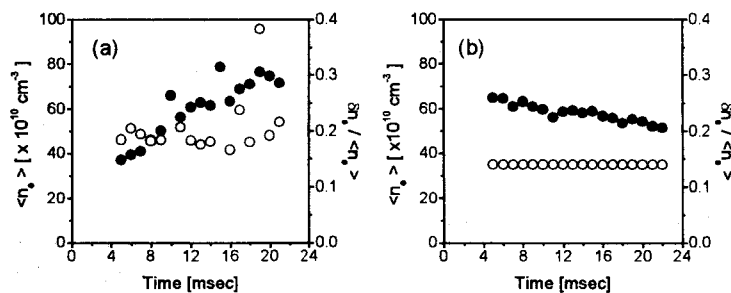


Fig. 2. Time dependences of plasma density (solid circle) and its fluctuation (open circle) for (a) a shot without discharge cleaning and (b) a shot with a discharge cleaning.

측정한 결과이다. 방전이 시작된 후 약 1~2 msec가 경과한 시점의 $\langle kT_e \rangle$ 는 14.4 eV이고, $\langle V_f \rangle$ 는 20.2 V이었다. 이 값은 플라즈마 전류가 평활한 영역($\Delta t=17$ msec)에서 시간 평균한 것이다. 여기서 n_e 는 증가하는 경향을 보여, $\Delta t=1$ msec에 대한 평균값을 취하였고, 그림 3(a)과 같이 $\langle n_e \rangle$ 는 $3.7 \sim 7.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 로 시간에 따라 증가하였다. 그림 2에서 보듯이 언저리 영역에서 플라즈마 섭동량(fluctuation)이 탐침 측정결과에 나타났다. 플라즈마밀도의 섭동량은 그림 3(a)에 나타난 것처럼 시간에 따라 $\delta n_e / \langle n_e \rangle \sim 0.2$ 로 $\langle n_e \rangle$ 의 변화 폭에 비해 크지 않았다. 그런데 RF glow 방전 세정을 한 후에는 그림 3(b)에서 보듯이 $\langle n_e \rangle$ 는 시간에 따라 $6.5 \sim 5.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 로 감소하였고, $\delta n_e / \langle n_e \rangle = 0.15$ 로 일정하였다. 이와 함께 토카막 방전실험을 진행하며 shot별로 측정된 H_α 선량($\Delta t=2$ msec동안 측정된 총량)이 그림 4와 같았다. shot을 진행할수록 H_α 선량이 감

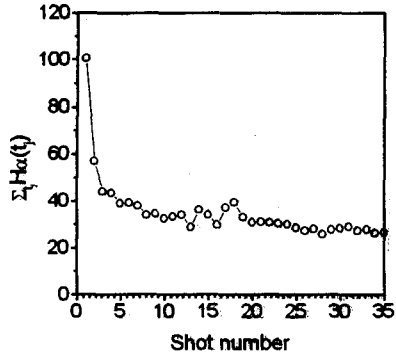


Fig. 4. H_α - radiation vs. shot number.

의 경우와 유사한 특성을 나타냈다. 이로서 언저리 영역에서 고정된 위치의 섭동량은 시간에 따라 크게 변하지 않음을 알 수 있었고, 방전 세정시에 특히 $\delta n_e / \langle n_e \rangle$ 이 보다 낮은 값을 나타냈다.

2) 플라즈마 파라미터의 profile 및 섭동량의 이동속도 측정

언저리 플라즈마 영역인 $z/a = 0.7 \sim 1.1$ 에 대하여 탐침을 이동하며 측정된 전자온도, 플라즈마밀도 및 부유전압의 profile은 그림 5와 같았다. 그림 5의 결과는 플라즈마전류가 평활한 영역 중에 $\Delta t \sim 2$ msec 구간의 시간 평균값으로 각각 $\langle n_e \rangle = 6.6 \sim 0.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $\langle kT_e \rangle = 15 \sim 4 \text{ eV}$, $\langle V_f \rangle = 22 \sim 2 \text{ V}$ 이었다. 이 값은 탐침을 장치 벽쪽으로 이동함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이들의 섭동량은 각각 $\delta n_e / \langle n_e \rangle = 0.2 \sim 0.5$, $\delta kT_e / \langle kT_e \rangle = 0.2 \sim 0.4$, $\delta V_f / \langle V_f \rangle = 0.3 \sim 1.7$ 이었다. 섭동량은 탐침을 장치 벽쪽으로 이동함에 따라 증가함을 보였고, $\delta n_e / \langle n_e \rangle \sim \delta kT_e / \langle kT_e \rangle$ 을 나타내었다. z/a 값에 대한 섭동량 profile은 타 논문⁸과 비교시 유사하였다.

에 의한 플라즈마만이 존재함으로 시간이 감에 따라 감소하는 $\langle n_e \rangle$ 를 보였다. 이상의 결과로부터 시간적으로는 측정된 플라즈마밀도, 전자온도, 부유전압의 평균값은 방전조건에 따라 변화함을 보였으나 이들에 대한 섭동량은 거의 변하지 않았다. 이상으로 토카막방전조건 중의 하나인 방전세정이 언저리 플라즈마에 미치는 효과로 $\langle n_e \rangle$ 는 시간에 따라 감소 혹은 증가했고 $\delta n_e / \langle n_e \rangle$ 는 방전세정 후에 보다 낮은 값을 나타냈으나 시간에 따라서는 거의 일정하였다. $\langle kT_e \rangle$ 와 $\langle V_f \rangle$ 는 $\langle n_e \rangle$ 보다 시간에 따른 변화 폭이 매우 작았고, 섭동량은 n_e

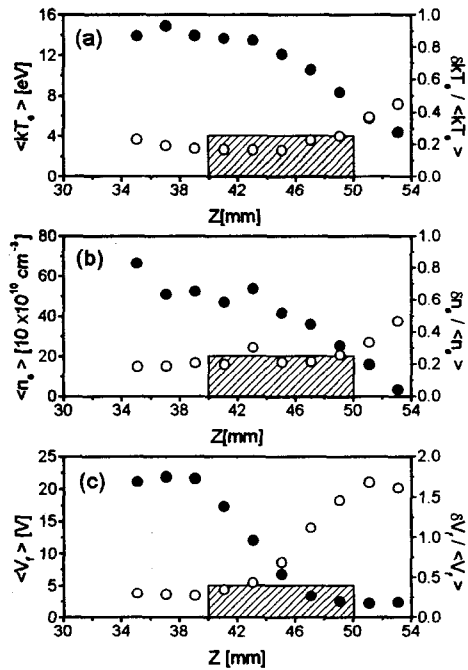


Fig. 5. Profiles of edge conditions. (a) electron temperature(solid circle) and its fluctuation(open circle), (b) plasma density(solid circle) and its fluctuation(open circle) and (c) floating potential(solid circle) and its fluctuation(open circle). The limiter position is shown in the shaded area.

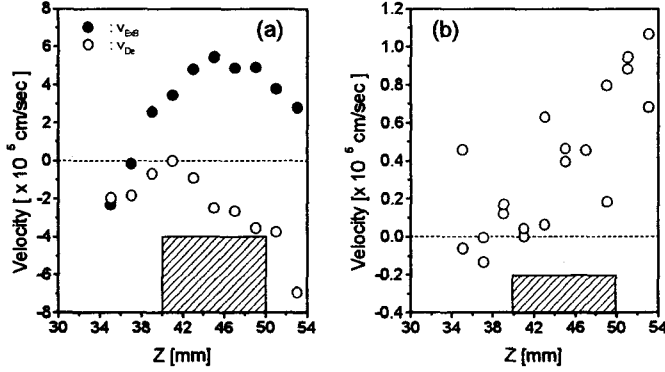


Fig. 6. Profile of (a) $E_z \times B$ velocity and gradient drift velocity $v_{\nabla p}$ and (b) radial plasma velocity \tilde{v}_r . The limiter position is shown in the shaded area.

언저리 영역에서 섭동량은 $E_z \times B_T$ 및 압력구배 (gradient)에 의한 $\nabla p \times B_T$ 로부터 poloidal 방향으로의 drift가 존재한다.² 속도 값이 음이면 전자 diamagnetic 방향이고, 양이면 이온 diamagnetic 방향과 같다. 그림 5에서 얻게 되는 z 방향 구배를 이용하여 $E_z \times B$ 속도 $v_{E \times B} = cE_z/B_T$ 와

압력구배에 의한 drift 속도 $v_{\nabla p} = -(\Delta p/\Delta z)/qn_e B_T$ 를 그림 6(a)와 같이 얻게 되었다. z 방향의 전기장은 $E_z \approx -\Delta\phi_p/\Delta z$ 로부터 구하였다. 여기서 ϕ_p 는 플라즈마전위로 $\phi_p = V_f + C_1 kT_e$ ($C_1 \approx 3$)의 관계식으로부터 구하였다. 압력구배 값은 $\Delta p/\Delta z \approx \Delta(\gamma_e n_e kT_e)/\Delta z$ 로부터 구하였다. 위 식(1)과 식(2)를 이용하여 구한 두 가지 속도의 z 방향 profile은 그림 6(a)와 같다. 이 drift 속도로 섭동량은 poloidal 방향으로 이동하게 된다. 그림 6(a)에 나타난 속도 값은 타논문⁸과 비교시 거의 유사하였다. 그림에서 보듯이 $v_{E \times B}$ (●)는 z/a 값에 따라 증가하며, 리미터 근처부터 이온 diamagnetic 방향으로 drift하게 되고, 그 양은 최대로 $\sim 6 \times 10^5$ cm/sec의 값을 가졌다. $v_{\nabla p}$ (○)는 모두 전자 diamagnetic 방향으로, 리미터 근처 전 후에서 크기가 감소하다 증가하는 profile을 보였고, 리미터 내에서 최대로 -4×10^5 cm/sec의 값을 보였다. 이 두 속도 값으로부터 섭동량은 poloidal 방향으로 $+2 \times 10^5$ cm/sec의 속도 값으로 진행함을 알 수 있었다.

이 drift에 의해 섭동량 자체에 의한 전기장 \tilde{E}_z 이 야기된다.² 이 때문에 주어진 B_T 과 \tilde{E}_z 에 의한 drift 속도가 다시 발생하게 된다. 따라서 토카막 내에서는 저주파수 대역의 섭동량 ($\omega \ll \omega_a$)은 반경방향으로 $\tilde{v}_r \approx c\tilde{E}_p/B_T$ 의 속도를 갖고 이동하게 된다.² 속도 값이 음이면 플라즈마내부로 이동하는 것이고, 양이면 장치 벽쪽으로 이동함을 뜻한다. \tilde{E}_z 는 $\tilde{E}_p \approx \nabla\delta\phi_p/\Delta z$ 와 같은 관계식으로 구하게 된다.⁹ 본 실험에서는 $\delta\phi_p$ 값을 삼중정전탐침에서 두 tip간 부유전압 섭동량의 차로부터 $\phi_p = V_f + C_1 kT_e$ 를 이용하여 구하였다. 그 결과는 그림 6(b)에 보듯이 $z/a > 0.8$ 에서 z 가 증가할수록 \tilde{v}_r 는 증가함을 보였다. 리미터 내에서는 \tilde{v}_r 가 최대로 0.6×10^5 cm/sec임을 보였다. 이는 벽쪽에서의 섭동량이 이동함을 의미한다. 즉 $\delta n_e \cdot \tilde{v}_r$ 은 벽쪽에서의 손실량

인 입자속(flux)이 된다. 이로서 \tilde{v}_r 는 플라즈마 confinement와 관련하여 중요한 인자가 된다.

4. 결론 및 토의

토카막 방전시 언저리 영역에서 측정된 플라즈마밀도, 전자온도 및 부유전압에 대한 시간특성을 조사했다. 방전 세정한 후에는 시간에 따른 변화 폭과 섭동량의 크기가 줄어들었으나, 섭동량은 크게 변하지 않았다. z/a 에 대한 측정값의 profile로부터 전기장 및 압력구배에 의한 drift 속도를 계산했으며, 리미터 근처에서 두 속도 값으로 섭동량이 이온 diamagnetic 방향으로 최대로 $\sim 6 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 의 값을 갖고 이동함을 알 수 있었다. 섭동량 자체에 의해 유기된 전기장 \tilde{E}_p 으로부터 반경방향으로의 이동속도를 계산했으며, 리미터 영역에서부터 이 속도 값은 장치벽 쪽 방향으로 증가함을 알 수 있었으며, 리미터 내부에서 \tilde{v}_r 가 최대로 $0.6 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 임을 보였다. 그래서 섭동량의 입자속인 $\delta n_e \cdot \tilde{v}_r$ 은 벽쪽으로의 손실량을 의미하게 된다. 이로서 토카막 방전 조건에 따라 언저리 플라즈마가 변화함을 확인했으며, 특히 방전 세정시 플라즈마밀도 변화가 크게 감소함을 알 수 있었다. poloidal 방향으로의 섭동량 이동을 drift 속도를 계산하여 예상하였으며, 보다 정확한 규명을 위하여 실제 섭동량의 위상(phase)속도 측정이 요구됐다. 섭동량 자체에 의한 이동효과를 보다 정확히 규명하기 위하여 \tilde{E}_p 이외에 자기장의 섭동량 \tilde{B}_T 에 대한 측정도 요구됐다. 마지막으로 KT-1 장치에서 저주파수 대역 섭동량에 의한 에너지 및 입자속 수송에 대한 연구를 위하여 \tilde{v}_r 와 함께 $\delta n_e \cdot \tilde{v}_r$ 에 대한 측정 및 해석이 요구됐다.

참고문헌

1. D.E. Post, R.Behrish, "Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion", Plenum Press (1984) New York
2. P.C. Liewer, Nuclear Fusion, 25 (1985) 543.
3. A.J. Wootton, B.A. Carreras, M. Matsumoto, K. McGuire, W.A. Peebles, Ch.P. Ritz, P.W. Terry and S.J. Zweben, Phys. Fluids B2 (1990) 2879.
4. N. Bretz, Rev. Sci. Instrum, 68 (1997) 2927.
5. M. Kamitsuma, S.L. Chen, and J.S. Chang, J. Phys. D: Appl. Phys., 10 (1977) 1065.
6. H.Ji, H. Toyama, K. Yamagishi, S. Shinohara, A. Fujisawa, and K. Miyamoto, Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 2326.
7. S.J. Zweben, R.W. Gould, Nuclear Fusion, 23 (1983) 1625
8. Ch.P. Ritz, R.D. Bengtson, S.J. Levinson, E.J. Powers, Phys. Fluids 27 (1984) 2956.
9. S. Zweben, P.C. Liewer and R.W. Gould, J. Nuclear Materials 111&112 (1982) 39.