

RF보상 삼중탐침을 이용한 한빛자기거울플라즈마의 진단과 특성 연구

최익진, 박남석, 정진욱, 이상근¹⁾
 한양대학교, 핵융합연구센터¹⁾

The study of Hanbit magnetic mirror plasma diagnostics and characteristics by RF compensation triple probe

Ikjin Choi, Namsuk Park, Chinwook Chung, S G Lee¹⁾
 Hanyang Univ, National Fusion Research Center¹⁾

Abstract - 현재 한빛 플라즈마에서 운영되고 있는 전자기 진단장치는 정전탐침, 자장탐침 및 반자성루프 등이 있다. 정전탐침은 고정식, 이동식, 고속추사방식 세 종류의 진단장치가 개발되어 실험에 이용되어 왔는데 비교적 쉽게 많은 종류의 probe와 다양한 probe tip을 구성할 수 있기 때문에 한빛 장치에서 axial 및 azimuthal 방향으로 전자 온도/밀도 및 그들의 분포를 측정하고 있다. 단일탐침에서 사용되던 RF 보상기기술을 삼중탐침에서도 적용시켜 RF 보상 삼중탐침을 개발하였다. 기존의 삼중탐침의 경우에는 DC에 대해서는 높은 임피던스로 외부에 부유되어 있지만 RF의 경우에는 외부와 부유되지 않고 낮은 임피던스로 연결되어있는 경우가 많았다. 하지만 RF보상 삼중탐침의 경우에는 RF의 경우에도 충분히 큰 임피던스로 부유되어 있다. 따라서 보다 예민하지 않은 측정을 할 수 있다. RF보상 삼중탐침을 이용하여 한빛 Mirror 플라즈마에서 axial 방향으로 Plasma 변수들의 변화를 관찰하면서 기존의 탐침에서 볼 수 없던 여러 특성을 관찰할 수 있었다.

1. 서 론

한빛플라즈마는 자기거울방식의 플라즈마로 RF를 펄스로 구동하는 플라즈마이다. 짧은 시간에 플라즈마가 발생되고 없어지므로 한빛플라즈마의 측정에는 빠른 시간분해능이 요구된다. 플라즈마 진단법에는 많은 방법이 있지만 가장 많이 사용하는 방법이 정전탐침법이다. 정전탐침법에는 단일탐침법과 이중탐침법, 삼중탐침법 등이 있다. 단일탐침법은 탐침에 전압을 인가하면서 탐침에 흘러 들어오는 전류를 측정하여 I-V 곡선을 분석하여 플라즈마 변수를 구하는 방법이다.

이에 비해 삼중탐침은 하나의 기준 탐침과 바이어스 전압으로 연결된 두 개의 탐침으로 구성되어 있다. 기준탐침과 바이어스탐침과의 전압 차와, 바이어스로 연결된 두 탐침에 흐르는 전류값으로 전자온도와 밀도를 구할 수 있다. 삼중탐침의 경우 다른 탐침의 측정법과는 다르게 I-V 곡선을 구하기 위한 전압을 Sweep할 필요가 없으므로 실시간으로 전자온도와 밀도를 구할 수 있다. 또한 이에 따른 높은 시간 분해능을 가지므로 빠르게 변화하는 플라즈마나 펄스파워로 구동되는 플라즈마의 측정에도 사용할 수 있다. 그리고 Floating 방식의 disturbance가 적은 장점을 가지고 있다.

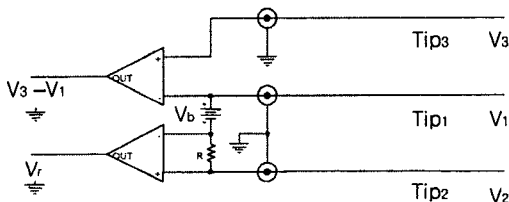
한빛 플라즈마는 빠른 시간분해능이 필요하므로 삼중탐침법을 사용하여 측정을 하였다. 하지만 한빛 플라즈마에서는 그 동안 RF보상을 하지 않은 삼중탐침을 이용하여 Plasma 변수를 측정하였다.

RF전원으로 구동하는 플라즈마의 경우에는 플라즈마가 RF로 떨리기 때문에 삼중 탐침의 측정에 영향을 주어 측정의 정확도를 떨어뜨린다. 따라서 삼중 탐침을 이용하여 측정할 때에도 RF보상을 하여 정확도를 높여 주어야 한다. 그러므로 한빛에서 RF보상형 삼중탐침을 이용하여 비교 측정해 보았다.

2. 본 론

2.1 삼중탐침

정전 삼중 탐침은 세 개의 탐침으로 플라즈마의 전자온도와 밀도를 구할 수 있는 정전 탐침 진단법이다. 삼중탐침은 빠른 시간에 플라즈마 변수를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 펄스파워로 구동하는 플라즈마나 시간에 대해 변화가 심한 플라즈마에서 주로 사용된다. 삼중탐침은 하나의 부유 탐침과 바이어스 전압으로 연결된 두개의 탐침으로 구성되어 있다. 기준 탐침과 바이어스 탐침과의 전압 차와, 바이어스로 연결된 두 탐침에 흐르는 전류 값으로 전자온도와 밀도를 구할 수 있다.[1]



<그림 1> 정전 삼중 탐침의 회로도

그림 1은 삼중탐침의 회로도이다. Tp3은 부유 되어 있고 Tp1, Tp2 사이에는 부유된 바이어스 전압을 걸 수 있게 되어 있다. 또한 Tp1, Tp2 사이에 저항을 연결하여 Tp1에서 Tp2로 흐르는 전류의 값을 측정할 수 있게 하였다. Tp1과 Tp3, R 양단을 각각 차동 증폭기에 연결하여 Tp1과 Tp3의 전위차와 R에 걸리는 전위차를 측정 할 수 있게 하였다. 삼중 탐침의 작동원리는 한 탐침은 부유 시키고, 나머지 두 탐침 사이에 일정한 바이어스전압을 걸어 각각의 탐침의 전압의 차이로 전자온도와, 이온의 밀도를 구하는 방법이다. 탐침에 일정한 전압이 걸렸을 경우 탐침으로 들어오는 전류의 양은 다음식과 같다.

$$I_b = -I_{e1} e^{\frac{e(V_1 - V_2)}{kT_e}} + I_{i1}$$

Tp3은 플로팅 탐침으로 전류가 흐르지 않고, Tp1와 Tp2는 플라즈마와 함께 페로로 연결이 되어 있으므로 Tp1에서 나가는 전류의 양은 Tp2에서 들어오는 전류의 양과 같게 된다. 각각의 탐침에 들어오는 전류의 양을 I_1, I_2, I_3 라고 하면 $-I_1 = I_2, I_3 = 0$ 이므로

$$\frac{-I_1 + I_2}{-I_1 + I_3} = \frac{1 - e^{\frac{e(V_2 - V_1)}{kT_e}}}{1 - e^{\frac{e(V_3 - V_1)}{kT_e}}} = 2$$

위식이 되어 이 식을 풀어 T_e 를 구할 수 있다. 만약 바이어스를 높은 전압으로 주어 $V_2 - V_1 = 0$ 가 되면

$$T_e = -\frac{V_3 - V_1}{\ln 2}$$

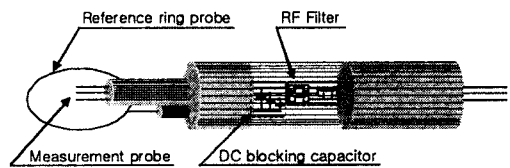
위식으로 간략화 할 수 있다. 또한 이 경우에 Tp2로 들어오는 전류는 거의 대부분 이온에 의한 전류라고 볼 수 있으므로

$$I_2 \approx I_{i2} = 0.61en_e u_{B2} A_2 \rightarrow n_e = \frac{1.64 I_{21}}{e A_2 \sqrt{\frac{kT_e}{M}}} = \frac{1.64 \frac{V}{R}}{e A_2 \sqrt{\frac{kT_e}{M}}}$$

위 식처럼 나타낼 수 있다.

2.1.1 RF보상형 삼중탐침

삼중탐침은 세 개의 탐침이 모두 접지에 대해 부유된 형태의 측정법이다. 별다른 곡선의 분석없이 나온 결과값이 바로 측정값이 되기 때문에 간편하고 빠른 측정을 할 수 있는 장점이 있다. 삼중탐침의 정확한 측정을 위해서는 탐침을 접지에서 부유시키는 것이 중요하다. 접지에 대해 올바르게 부유되지 않으면 각각의 탐침에 걸리는 전압의 값이 원하는 측정값이라고 신뢰할 수 없다. 따라서 RF로 구동하는 Plasma의 경우 DC전압 뿐 만아니라 RF전압에 대해서도 확실히 부유를 시켜야한다. 탐침을 RF로부터 부유시키는 방법은 기본적으로 단일탐침에 사용한 RF보상법과 같은 방법을 사용하였다.[2]

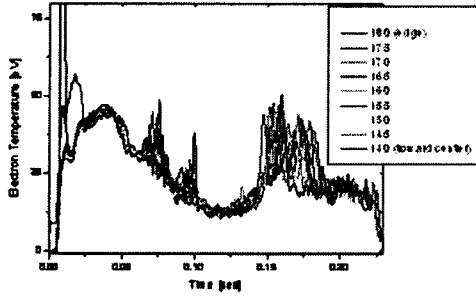


<그림 2> RF보상형 삼중탐침의 구조

그림 2는 RF보상형 삼중탐침의 구조이다. 단일 탐침과 마찬가지로 낮은 입력 임피던스를 위하여 Reference Ring Probe를 사용하였고 Reference Ring Probe에서 들어오는 전류를 막기 위해 DC Blocking Capacitor를 사용하였다. 그리고 RF에서 높은 임피던스를 가지는 Chock Filter를 삽입하여 RF에 대해서도 충분히 부유시켰다.

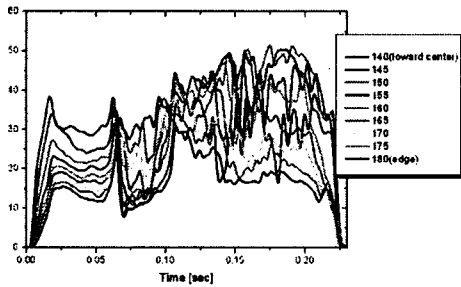
2.2 한빛플라즈마의 측정

한빛 플라즈마에서는 그 동안 RF보상을 하지 않은 삼중탐침을 이용하여 Plasma 변수를 측정하였다. 따라서 한빛에서 RF보상형 삼중탐침을 이용하여 비교 측정해 보았다.



〈그림 3〉 RF 보상안된 삼중탐침의 전자온도 측정값

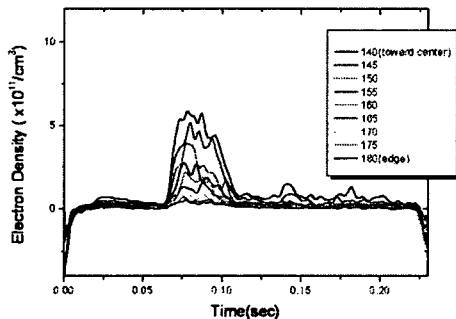
그림 3은 RF 보상하지 않은 삼중탐침을 이용하여 전자온도를 Radial 위치에 따라 비교한 그림이다.



〈그림 4〉 RF보상형 삼중탐침의 전자온도 측정값

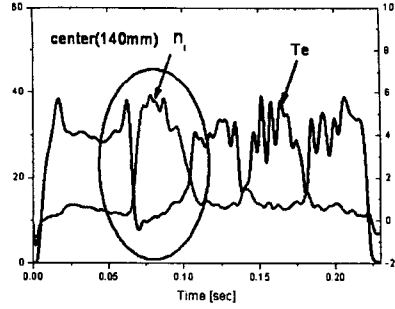
그림 4는 RF보상형 삼중탐침을 이용하여 전자온도를 Radial 위치에 따라 비교한 그림이다. RF를 보상하지 않은 삼중탐침의 측정 결과에서는 Radial 위치에 따른 전자온도의 차이가 거의 보이지 않는데 반해 RF보상형 삼중탐침의 측정 결과에서는 Radial 위치에 따라서 전자온도의 차이가 확연하게 보인다.

RF보상형 삼중탐침의 측정 결과로는 중앙쪽으로 갈수록 전자온도가 높아짐을 확인할 수 있고 시간이 지남에 따라 Center와 Edge의 플라즈마의 전자온도가 뒤섞임을 알 수 있다.



〈그림 5〉 RF보상형 삼중탐침의 이온밀도 측정값

그림 5는 RF보상형 삼중탐침으로 이온밀도를 측정한 결과이다. 이 결과도 마찬가지로 중앙으로 갈수록 Plasma의 밀도가 높아짐을 확인할 수 있었다.



〈그림 6〉 중앙에서 전자온도와 이온밀도의 변화

그림 6은 RF보상형 삼중탐침으로 시간에 따라 이온밀도와 전자온도의 측정값을 나타낸 그림이다. 위 그림에서 70ms 부근에서 이온밀도가 급격하게 증가하면서 전자온도가 급격히 식어버리는 현상이 보인다. 이 현상은 이온화가 일어나면서 이온들이 용기 벽에 흡착되었던 기체들을 떨어뜨려 중성기체의 밀도가 높아지면서 이온화가 급속도로 진행하여 생기는 현상이다. 전자들이 이온화를 시키며 자신이 가지고 있던 온도를 빼앗겨 버려 전자온도가 급속도로 식고 이온밀도가 급격하게 증가하게 된다. 고온의 전자온도를 가지기 위해서는 용기벽에 흡착된 기체를 줄이는 것이 중요함을 알 수 있다.

3. 결 론

삼중탐침법은 시간분해능이 좋아 이온밀도와 전자온도의 시간에 따라 변하는 구하는데 많이 사용한다. 하지만 단일탐침법에서 마찬가지로 RF보상을 하지 않고 사용할 경우 왜곡이 생긴 결과값을 얻게 된다. 따라서 삼중탐침법을 사용할 경우에도 단일탐침과 마찬가지로 RF보상을 하여 측정을 하여야 한다.

한빛자기거울플라즈마는 펄스로 구동되어 짧은 시간에 전자온도와 이온밀도의 변화를 측정하기 위해 삼중탐침법을 사용하였다. 하지만 RF보상을 하지 않고 측정을 하여 측정값에 오차가 생긴다.

따라서 RF보상형 삼중탐침을 이용하여 한빛자기거울플라즈마를 측정하여 RF로 보상하지 않은 삼중탐침법으로는 보이지 않던 여러 현상들을 알 수 있었다. RF보상형 삼중탐침법으로 측정된 전자온도와 이온밀도가 Radial 방향으로 변화하는 모습을 확인할 수 있고, 시간이 지나면서 용기벽 흡착된 기체가 빠져나와 전자온도를 낮추는 현상도 확연하게 보여줌을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jen-Shih Chang *et al*, "The instantaneous triple-probe method for the direct display of plasma parameter in a low density continuum plasma", J.Phys.D, 13, 1083-92, 1980
- [2] U Flender *et al*, "RF harmonic suppression in Langmuir probe measurements in RF discharges", Plasma Sources Sci. Technol. 5, 61-69, 1996