

자기 탐침에 의한 세타 핀치 플라즈마의 진단

*심 재학⁰ *조 주현 *장 용무 **정 운관 *강 형부
*한양 대학교 **조선 대학교

Diagnostics of Theta-Pinch Plasma by Magnetic Probe

*Shim J.H. *Cho J.H. *Chang Y.M. **Chung W.K. *Kang H.B.
*Hanyang Univ. **Chosun Univ.

Abstract

Some magnetic probes for theta-pinch experiment have been constructed. Methods of building the coil, connecting it to the oscilloscope, shielding and enclosing the probe are described. Such a probe has been used to measure the magnetic flux penetrating it within theta-pinch plasmas.

본 연구에서는 펄스형 자장 측정에 이용될 응답 시간이 빠른 자기 탐침을 제작하여 핵융합 고온 플라즈마 발생 장치인 세타 핀치의³⁾ 단면 코일에서의 공간적 자장 분포와 자장의 시간적 변화를 살펴 보기로 한다.

II. 이 론

I. 서 론

실험실 단위에서 혹은 다른 여러 형태로 존재하는 플라즈마에 대한 여러가지의 물리량을 조사하여 그 특성을 연구하기 위한 여러가지 진단 방법이 개발되어 왔고 또, 많은 발전을 거듭하여 왔다. 일반적으로 고온 플라즈마는 자장에 의해 발생되거나, 밀폐되는 경우가 많다. 따라서, 플라즈마를 연구하는 데 있어 플라즈마의 내부와 외부의 자장 분포가 아주 중대한 역할을 하게 된다.

이러한 자장 분포를 알아보기 위한 방법중의 하나인 자기 탐침법은 플라즈마 내부에 삽입하는 관계로⁵⁾ 그 주위의 플라즈마 특성을 변화 시킴에도 불구하고 그 구조가 간단하여 제작이 쉽고, 설치가 용이하며, 작은 공간을 차지하기 때문에 많이 이용되는 진단법이다.

자기 유도 탐침은 작은 솔레노이드 코일로 플라즈마에 삽입하여 코일에 유기되는 기전력을 측정, 자계의 변화를 구할 수 있다.

탐침의 코일에 쇠고하는 자속 ϕ 의 변화에 의해 나타나는 유기 기전력 U_i 는 식 (1)이 되고

$$U_i = -\frac{d}{dt}\phi \quad (1)$$

이때, 탐침이 아주 작아서 코일 단면적 A에서 쇠고 자속 밀도 B가 변하지 않는다면 U_i 는 식(2)로 쓸 수 있다.

$$U_i = -\frac{d}{dt}B \\ = -\frac{1}{4}\pi n^2 d^2 \frac{d}{dt}B \quad (2)$$

여기서, A는 코일 단면적, n은 권선수, d는 코일 직경이다.

간략화한 탐침의 회로를 그림 1.에 나타낸다.

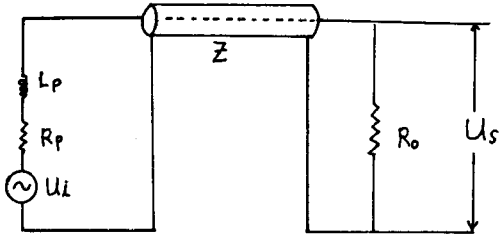


그림 1. 간략화된 탐침회로

그림 1.에서 R_o 는 신호파의 반사를 막기 위한 임피던스 정합용 저항으로, 케이블의 특성 임피던스와 같다. 그림 1.의 회로를 흐르는 전류를 I 라 하면 코일에 발생하는 기전력 U_s 는 식 (3)과 같다.

$$U_s = L_p \frac{dI}{dt} + I(Z + R_p) \quad (3)$$

또, $U_s = R_o I = ZI$ 이므로, 신호전압 U_o 는 식 (4)로 주어진다.

$$U_o = \frac{Z}{Z + R_p} U_i \left(1 - \frac{L_p}{Z} \frac{dU_s}{dt} \right) \quad (4)$$

결국 dB/dt 에 비례하는 신호를 얻기 위해서는 탐침의 상승시간 τ 는

$$\tau = \frac{L_p}{Z + R_p} \quad (5)$$

신호의 상승 시간보다 훨씬 짧아야 한다. 따라서, 코일의 인덕턴스는 가능한한 작아야 하며, 가능한 공진 주파수를 플라즈마의 최고 주파수보다 높게 유지하여야 한다.¹⁾

식 (2)에서 탐침에 유기되는 기전력 U_s 는 dB/dt 에 비례하므로, 자장 $B(t)$ 를 측정하기 위하여 탐침과 오실로스코프 사이에 적분기를 설치하여야 한다. 가장 간단하고 안정한 적분회로는 수동형 RC 적분기로 그림 2.에 나타내었다.

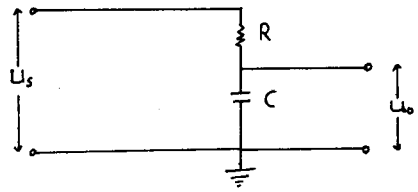


그림 2. 수동형 RC 적분기

그림 2.의 회로에서 U_o 는 식 (6)으로 주어지므로

$$U_o = \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt - \frac{1}{RC} \int_0^t U_o dt \quad (6)$$

오차 ΔU_o 를 고려하여 식 (7)이 성립하면 U_o 는 식 (8)로 된다.

$$\left| \frac{1}{RC} \int_0^t U_o dt \right| < \Delta U_o \quad (7)$$

$$U_o = \frac{1}{RC} \int_0^t U_s dt \quad (8)$$

통상 적분시간 $\tau = RC$ 값은 관찰 시간의 약 10배 정도의 값을 취한다. 이 때의 R 값은 오실로스코프의 입력 저항 R_o 보다 훨씬 작아야 하며, 커패시터에 걸리는 신호 전압이 충분히 크게 택해야 한다.²⁾

식 (8)에 식 (2)를 대입하여 U_o 를 구하면 식 (9)가 되어 오실로스코프의 입력을 구할 수 있다.

$$U_o = \frac{nA}{RC} B \quad (9)$$

III. 실험 방법 및 고찰

펄스형 대전류에 의한 플라즈마 측정에 이용되는 자기 탐침은 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.²⁾

- 1) 탐침 크기의 최소화
- 2) 빠른 전기 응답
- 3) 정전 노이즈에 대한 적절한 차폐

- 4) 회로 임피던스 정합
- 5) 충분한 자기 차폐
- 6) 우수한 기계적 강도
- 7) 탐침 코일의 배열

또한, 코일의 크기를 제한하는 요건을 보면, 공간적 분해능을 좋게 하기 위해 코일 길이 l 과 코일 직경 d 가 작아야 하고, 높은 유기 전압을 얻기 위해 nd^2 가 커야 하며, 인덕턴스를 작게 하기 위하여 nd^2 는 커야 한다.

이상의 여러가지 조건을 고려하여 제작한 탐침의 값들은 표 1.과 같고, 그 구조는 그림 3.에 나타나 있다.

표 1. 탐침의 사양

프로브 팁 직경	5 mm
프로브 팁 길이	50 mm
코 일 길 이	3 mm
코 일 직 경	2.1 mm
권 선 수	10
Wire 직 경	0.3 mm
코일 인덕턴스	109 nH
케이블 임피던스	50 Ω
코 일 저항	0.1 Ω

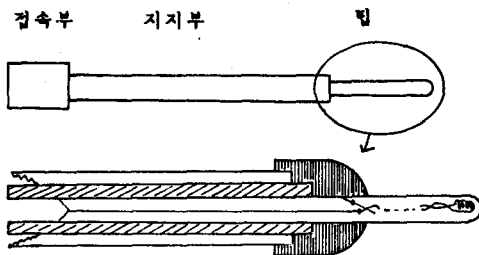


그림 3. 자기 탐침 구조도

탐침은 세 부분으로 구성되어 있는데 팁 부분은 석영관으로 코일을 지지하고 있으며 코일이 있는 수 mm를 제외하고는 노이즈를 방지하기 위해 은 박막을 입혀 동관에 접지하였다. 코일은 에나멜선으로 하였고 코일로부터 동축선까지의 리드선을 코일 외부의 자속을 피하기 위하여 꼬았다.

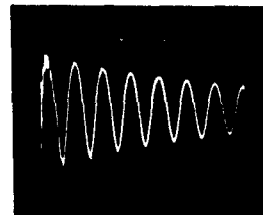
지지부에서는 동관이 파이렉스관으로 둘러 싸여져 있으며 동관의 내부로 신호를 전송하는 RG127/U 동축선을 넣어 코일 리드에 연결하였다. 파이렉스관은 노이즈 차폐용 동관을 플라즈마로부터 절연시키고 있다.

접속부에서는 금속함에 BNC 커넥터와 전송 케이블 및 동관을 연결하여 노이즈를 최소화하였다.

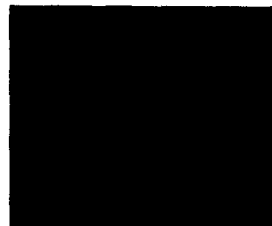
이렇게 제작한 탐침을 세타 편지 장치에 의해 발생된 고온 플라즈마의 내부,외부에 삽입하여 자장의 공간적 분포와 시간 변화를 측정하였다. 다음의 그림은 플라즈마 발생관 중심으로부터 거리에 따른 자장의 시간 변화 모습이다.

그림 4. 단면 코일 중심으로부터 거리에 따른 탐침의 유기 전압 파형
(단면 코일 반경: 20 cm)

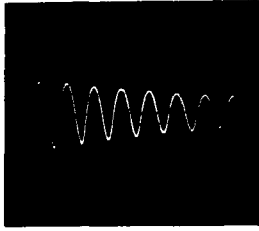
가) 탐침이 중심에 있을 때



나) 중심에서 7 cm 의 위치에 있을 때



다) 중심에서 18 cm 의 위치에 있을 때



제작한 자기 탐침의 응답이 아주 빠르고 노이즈에 대한 차폐 능력이 우수함을 그림 4. 의 파형에서 알 수 있다. 또한, 주파수 100 kHz 정도에서 적분기의 성능도 우수함을 알 수 있었다. 적분기는 10 KGauss 당 5V정도가 되도록 RC 값을 택하였다.

이 탐침에 유기되는 파형으로 보아 편치 코일의 중심으로부터 멀어져 갈수록, 즉 코일 면에 가까와 질수록 자장이 세게되어 플라즈마를 압축하게 됨을 알 수 있다.

이상에서 언급한 탐침의 제작 방법을 통하여 공간 분해능이 더욱 우수한 탐침을 제작할 수는 있겠지만 탐침 팁 내의 적절한 위치에, 정확한 각도를 갖도록 탐침을 배열하는 문제가 남아있다. 또한, 자계에 대한 차폐를 어떻게 시키는가가 중요한 숙제로 남아 있다.

* 참고 문헌 *

- 1) Boetticher W, Plasma Diagnostics, ed W Lochte-Holtgreven (Amsterdam: N. Holland), 1968
- 2) G. Decker et al., J. Phys. E : Sci. Ins., v. 5, p.481, 1972
- 3) W.A. Cilliers et al., Nuclear Fusion, v.3, p.78, 1963
- 4) C. S. Wong, Laser and Plasma Technology, ed World Scientific Pub. (Singapore), 1985
- 5) K. Boyer et al., Phys. Rev., v.119, p.831 1960
- 6) E. M. Little et al., Phys. Fluids, v.4, p.711, 1961