

플라즈마 파라메타 측정용 고속 Langmuir 프로브

논문
9-5-11

구동회로 실현 및 적용

A Study on Fast Langmuir Probe Driving Circuit for Measurement of Plasma Parameter and Its Application

신 중 홍*, 고 태 언*, 김 두 환#, 박 정 후#

(Jung-Hong Shin, Tai-Eun Ko, Doo-Hwan Kim, Chung-Hoo Park)

Abstract

This paper deals with an inexpensive, simple and fast Langmuir probe sweeping circuit and its application. This sweeper completes a probe trace in a 1 ms order. Futhermore, the circuit drives a maximum probe voltage of ± 30 V and has a maximum probe current capability of a few amperes. The plasma parameters are successfully determined using the fast Langmuir probe method.

Key words(중요용어) : Plasma Parameter(플라즈마 파라메타), fast Langmuir Probe(고속 랑그뮤어 프로브), Probe Characteristics(프로브 특성)

1. 서 론

Langmuir 프로브에 의한 플라즈마의 전자온도 및 밀도의 수동 측정법¹⁾은 50년 이상의 역사를 갖지만 측정회로 및 측정방법이 간단하므로 최근의 새로운 플라즈마 진단법이 개발된 이후에도 여전히 많이 적용되고 있다.²⁾ 그러나, 이와같은 수동적인 방법으로는 정확하게 플라즈마를 진단하는데 여러가지 어려운 점이 있다.

첫째, 수동측정 중에 플라즈마 상태가 변화할 경우는 이 방법을 적용할 수 없다.

둘째, 플라즈마 중의 프로브는 측정을 반복하는 동안에 스파터링된 입자나 유기물 혹은 이온등에 의해 쉽게 오손되어 프로브의 전압-전류특성이 변화하므로³⁾ 방출형 프로브(emissive probe)⁴⁾방법의 오손 방지대책을 세우지 않으면 안된다. 이상과 같은 문제점을 개선하기 위해서는 프로브의 전압-전류특성을 고속으로 구할 수 있는 새로운 프로브 구동시스템을 개발해야할 필요가 있다. 현재까지

고속으로 측정하기 위한 몇가지 방법이 제안^{5,7)}되고 있지만 프로브의 스위프 전압의 크기가 충분치 않아 이온포화영역, 천이영역 및 전자포화영역등을 보여주는 완전한 프로브 특성곡선을 얻을 수 없는 점과 아울러 프로브 구동 회로의 출력전류가 충분치 않아 프로브 측정 중에 프로브 스위프 전압이 감소하여 프로브 특성곡선을 얻지 못하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 일반 플라즈마를 다루는 곳이면 어디든지 흔히 볼 수 있는 컴퓨터, Lab 카드 및 op amp를 이용하여 고속 프로브 구동 회로를 구성하였다. 이 구동회로는 -30 ~ +30 V에 이르는 스위프 전압 및 2000 mA에 해당하는 출력전류를 갖고 있어, 플라즈마에 삽입된 프로브에 전압을 인가하더라도 전압이 감소되지 않는 강인성을 갖고 있으며, 이 구동회로를 Ar 플라즈마에 적용하여 얻은 프로브의 전압-전류특성곡선으로부터 전자온도 및 밀도를 구하고, 이 결과와 종래의 수동방식의 결과를 비교검토하였다.

2. 회로구성 및 실험방법

2-1. 일반적인 싱글 프로브의 회로구성과 전자 온도 및 밀도 산정

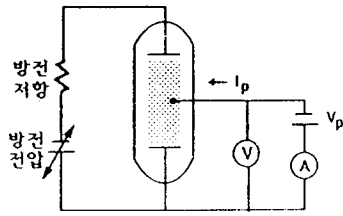
그림1(a)는 일반적인 프로브 회로구성을 나타내

* : 동의대학교 전기공학과

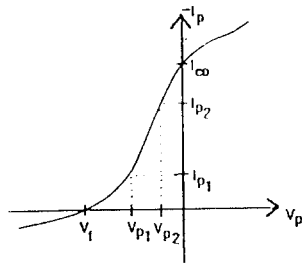
: 부산대학교 전기공학과

접수일자 : 1996년 2월 21일

심사완료 : 1996년 6월 19일



(a)



(b)

(a) 싱글 프로브의 회로구성
(b) 프로브의 전압-전류특성

그림 1. 싱글 프로브의 회로구성(a)과 전형적인 프로브의 전압-전류특성(b)

Fig. 1. Circuit diagram of single probe and typical probe characteristics

고 있으며, 그림 1(b)는 프로브 전압(V_p)을 정, 부로 변화할 경우 전형적인 프로브의 전압-전류특성을 나타내고 있다. 그림 1(b)특성이 구해지면 다음과 같이 플라즈마의 전자온도(T_e) 및 전자밀도(N_e)를 쉽게 구할 수 있다.¹⁾ 그림 1(b)에서와 같이 열확산전자전류를 I_{eo} 라 하고, 부동전위(floating potential)를 V_f 라 하자, 그리고, 곡선의 전이영역의 임의의 프로브 전압을 V_{p1} , V_{p2} 이라 하고, 이 전압에 대응한 프로브 전류를 각각 I_{p1} 및 I_{p2} 라 하면 T_e (eV)는 다음식으로 구할 수 있다.¹⁾

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{V_{p1} - V_{p2}}{\ln\left(\frac{I_{p1}}{I_{p2}}\right)} \quad (1)$$

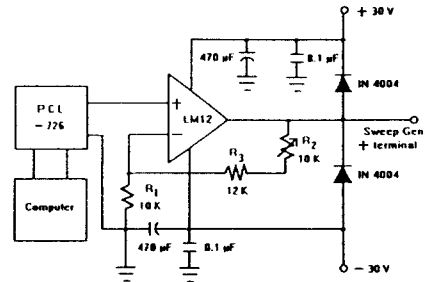
(1)식에서 T_e (eV)값이 구해지면 N_e (cm^{-3})는 다음식으로 구할 수 있다.¹⁾

$$N_e = 3.73 \times 10^{11} \cdot \frac{I_{eo}(A)}{A(cm^2) \cdot [T_e(eV)]^{1/2}} \quad (2)$$

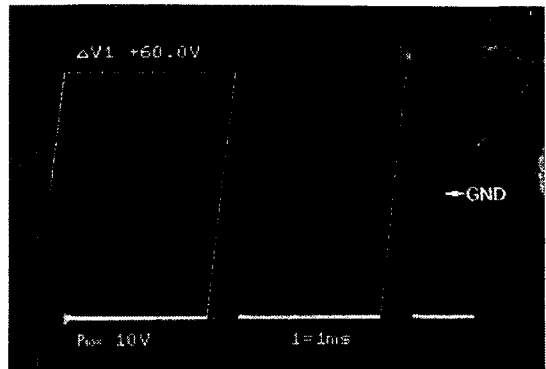
여기서, A는 프로브의 표면적을 나타내고 있다.

2-2. 본 연구에서 제안된 프로브 스위프 (sweep) 전압발생회로 구성과 특성제어

그림 2(a)는 본 연구에서 제안한 프로브 스위프 회로를 나타내고 있다. 그림에서 LM12는 power op amp(monolithic op amp)로서 전공급 전압이 80V 까지 사용 가능하며, 전류용량도 일반 실험실 플라즈마 측정에 충분한 수A의 공급이 가능하다.^{1,5)} 특히, 이 전력증폭기의 대역폭은 60 kHz 이고, 과전압 및 과전류 보호장치를 내장하고 있다. 그림에서 op amp의 이득을 조정하여 최대출력전압이 +30V 가 되도록 하였다. 그림에서 두종류의 콘덴서는 직류공급전압에 포함된 고주파 바이패스(bypass) 및 LM12에 일정 직류전압 공급하는 역할을 하고 있



(a)



(b)

그림 2. 프로브 스위프 전압 발생 회로도(a) 및 LM12 출력파형(b)

Fig. 2. Circuit diagram of probe sweep voltage(a) and output waveform of LM12(10V/div, 1ms/div)(b)

다. 그리고, 출력단에 두개의 다이오드는 직류전압의 공급을 안정하게 하는 역할을 하고 있다.

한편 op amp LM12의 입력으로는 컴퓨터에 내장된 디지털 신호를 아날로그 신호로 바꾸어 주는 Lab Card PCL-726(D/A converter, bipolar)의 톱니파전압 출력을 사용하였으며, 이때 톱니파 전압의 스위프 시간, 스위프 전압의 크기, slope 및 주파수등은 컴퓨터의 프로그래밍으로 제어가 가능하다. 그러나 PCL-726에서의 최대출력전압은 대략 ± 12 V 정도이고 전류용량은 수십 mA 정도이므로 앞서 논한 바와같이 전력증폭기 LM12 로서 증폭하여 사용하게 된다. 이상에서 논한 것이 스위프 전압(최대 약 ± 30 V)발생기로서 그림1의 V_p 전원 부분에 상당하며, 그림2(b)는 LM12의 ± 30 V 출력 파형을 나타내고 있다.

2-3. 오실로스코프(OSC)에 의한 플라즈마 프로브 특성곡선 구현

2-2절에서 구성한 스위프 전압발생기의 출력을 1ms 이내에 스위프 하여 얻어지는 프로브의 전압-전류 특성은 일반지시계기로서 읽을 수 없으므로 OSC 상에 나타낼 필요가 있다.

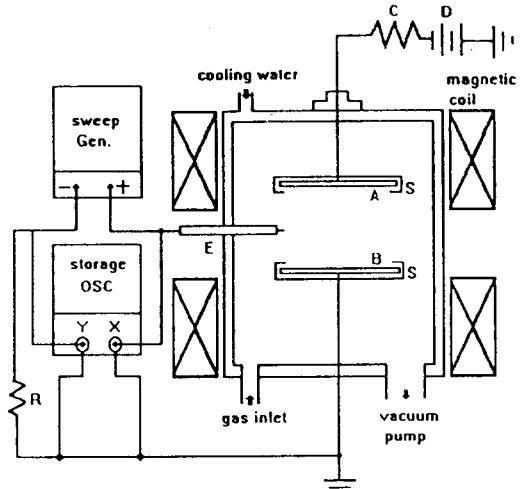
본 연구에서는 저장형 오실로스코프(storage oscilloscope, VC-6275, LG)를 사용하였으며, X-Y mode로 하여 X mode(OSC의 channel 1)에는 그림 1(a)의 전압계 V에 상당하는 프로브 전압을 인가하고, Y mode(OSC의 channel 2)에는 그림 1(a)의 전류계 A에 상당하는 전류를 전압으로 변환 후 인가하여 프로브의 전압-전류 특성을 OSC 상에 표시하는 동시에 기억할 수 있도록 하였다.

2-4. 플라즈마 발생장치 및 프로브 회로 구성

그림 3은 본 연구에서 구성한 Ar 플라즈마 발생장치 원리와 프로브의 전압-전류 특성 측정회로의 구성을 나타내고 있다. 방전전극은 2개의 원판상 황동전극을 마주 보게 배치한 2극 다이오드형으로 직경 50 mm, 전극간 간격 50 mm로 하여 전극간에 원통상 직류 플라즈마가 형성되도록 하였다.

특히, 음극은 금속으로 쉴드(shield)하고, 음극과 쉴드 간의 간격은 Paschen 최저값 이하로 유지한 후 쉴드는 접지하므로써 음극과 진공조(양극)와의 불필요한 방전을 억제할 수 있도록 하여 플라즈마 방전전류를 수백 mA 이상 흐를 수 있도록 설계 제작하였다.

플라즈마에 가해지는 자계는 진공조 외부에 설치한 2개의 코일군에 흐르는 직류전류를 가변시켜



A : 음극 B : 양극 C : 방전 안정용 저항
D : 직류 전원 E : 싱글 프로브 R : 프로브 전류 검출용 저항 S : shield

그림 3. 플라즈마 발생장치 원리와 프로브의 특성 측정 회로

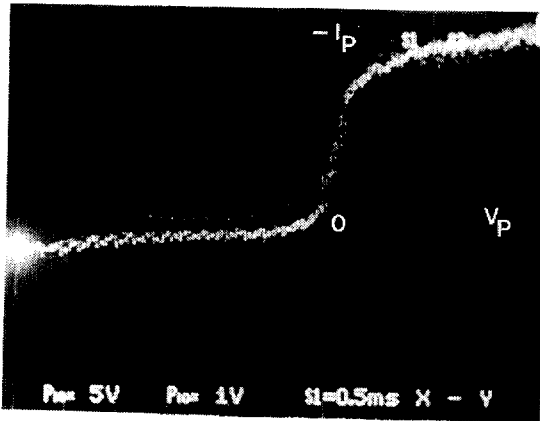
Fig. 3. Schematic diagram of plasma generator and probe circuit

0 ~ 500 G 까지 제어할 수 있도록 하였다. 진공조는 로타리 및 확산 펌프로 약 10^{-6} Torr 까지 초기 배기한 후 MFC(Mass Flow Controller)로서 Ar 가스 유량을 조절하여 0.1 Torr로 일정하게 유지하여 2kV(최대전류 2 A) 직류전원으로 직류플라즈마를 발생하였다. 프로브의 전압-전류 특성 측정회로는 2-2 및 2-3절에서 설명한 방법으로 구성된 회로를 나타내고 있다.

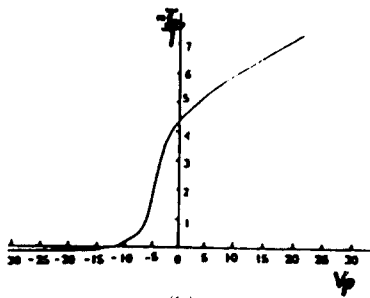
한편, 측정에 사용된 프로브의 재질은 텅스텐으로 하였고, 그 형상은 직경 0.25 mm, 길이 2 mm의 원통상으로 하였다. 더우기, 본 실험에서는 그림 1과 그림 3에 의한 방법에 의해 프로브의 특성곡선을 구한 후 그 결과를 비교 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

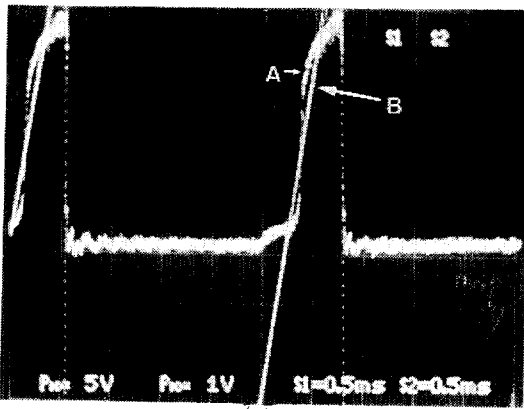
그림 4(a)는 방전전류 100mA, 자계 100G 인 조건하에서 얻어진 Ar 플라즈마에 설치한 프로브에 그림 2(b)의 톱니파 전압을 인가했을 경우, OSC에서 얻어진 프로브의 전압-전류 특성곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 $s_1 = 0.5$ ms는 스위프 시간이 0.5 ms 임을 나타내고 있으며, X축은 전압축으로 5 V/div이고, Y축은 전류축으로 1 V/div 즉, 전류로



(a)



(b)



(c)

그림 4. 자계 100 G, 방전전류 100mA의 dc 플라즈마에 대한 고속 프로브(a) 및 수동방식인 경우 (b)등의 프로브의 전압-전류특성곡선 (CH1: X-축, CH2: Y-축, 100 μ A/div.), 톱니파 전압 파형 및 프로브 전류 파형(c) (1 V/div, 0.5 5ms/div)(A: 프로브 전류파형, B : 프로브 전압파형)

Fig. 4. V-I characteristics of high speed probe(a), manual sweeper(b) and sawtooth voltage-probe current waveform(c) in the dc plasma of magnetic field 100 G and discharge current 100 mA

환산하면 100 μ A/div의 크기임을 나타내고 있다. 이 그림에서 플라즈마의 부동전위 및 공간전위는 각각 약 -1 V 및 +3 V임을 알 수 있으며 식 (1)과 식 (2)에서 전자온도 (T_e) 및 전자밀도 (N_e)를 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$T_e \approx 3.1(\text{eV}) \quad (3)$$

$$N_e \approx 3 \times 10^{10}(\text{cm}^{-3}) \quad (4)$$

한편, 동일한 플라즈마 조건하에서 수동방식으로 X - Y 레코드를 이용하여 구한 프로브의 전압-전류 특성곡선은 그림 4(b)와 같다. 이 경우 새 프로브를 사용하여 오손의 영향이 거의 없도록 배려하였다. 이 특성곡선에서 구한 T_e 와 N_e 값은 다음과 같다.

$$T_e \approx 3.3(\text{eV}) \quad (5)$$

$$N_e \approx 3.1 \times 10^{10}(\text{cm}^{-3}) \quad (6)$$

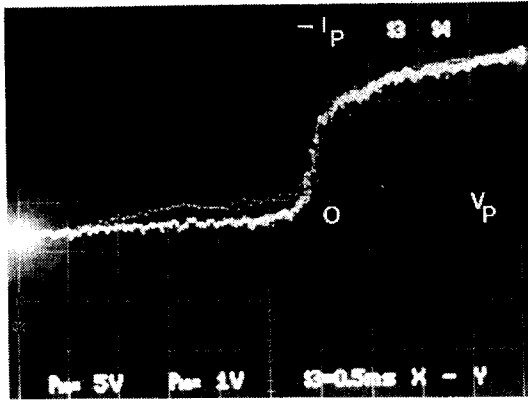
이상의 결과에서 알 수 있는 바와같이 본 연구에서 제안된 방식이 종래의 수동방식의 결과와 거의 일치하고 있으며, 더구나 종래 방식보다 고속으로 프로브의 전압-전류 특성곡선이 얻어질 수 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 4(c)는 그림 4(a)와 같은 실험조건에서 얻어진 프로브 전압(그림에서 B파형)에 대한 프로브 전류(그림에서 A파형)를 나타내고 있다.

그림 5(a)는 그림 4(a)에서의 실험조건과 같으나 자계를 100 G에서 150 G로 증가시켰을 경우, 프로브의 전압-전류 특성곡선을 나타내고 있다. 그림 4(a)와 비교해 보면 자계가 증가할 경우에는 전자포화전류가 크게 감소하게 됨을 알 수 있다. 이러한 특성은 자계가 150 G 일때, 프로브 전류(그림 5(b)의 A파형)와 자계가 100 G 일 때, 프로브 전류(그림 4(c)의 A파형)를 비교해 보아도 쉽게 알 수 있다. 그림 5(a)에서 구한 T_e 및 N_e 값은 다음과 같다.

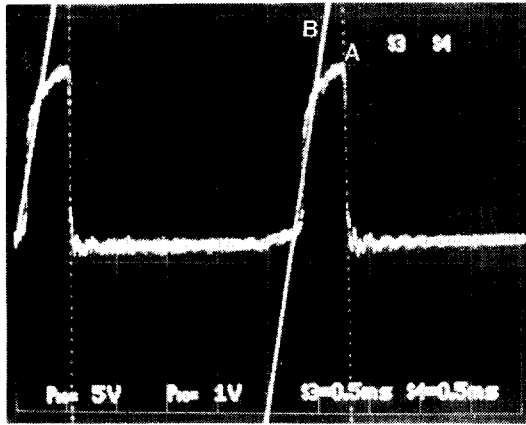
$$T_e \approx 4.7[\text{eV}] \quad (7)$$

$$N_e \approx 2.0 \times 10^{10}[\text{cm}^{-3}] \quad (8)$$

즉, 자계가 증가함에 따라 전자온도는 증가하지만 전자밀도는 감소하고 있음을 알 수 있다. 그 원인은 다음과 같이 생각할 수 있다. 우선, 자계 존재하에서 전자는 잘 알려진 바와같이^{1,3)} 회전운동을 하게되며 그 반경 r_L (Larmor radius) 및 사이클로트론 주파수 ω_c (Cyclotron frequency)는 전자의 질량 m , 자계에 수직 방향 속도를 v , 자계를 B 라면 다음과 같이 주어진다.



(a)



(b)

그림 5. 자계 150G, 방전전류 100 mA의 dc 플라즈마에 대한 프로브의 전압-전류 특성곡선(a) (CH1:X-축, 5 V/div., CH2:Y-축, 100 μ A/div.), 톱니파 전압파형 및 프로브 전류 파형(b) (1 V/div., 0.5 ms/div.) (A : 프로브 전류 파형, B : 프로브 전압파형)

Fig. 5. Probe V-I characteristics(a) and sawtooth voltage-probe current waveform(b) in the dc plasma of magnetic field 150 G and discharge current 100 mA

$$r_L = \frac{mv}{eB} \quad (9)$$

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (10)$$

그러므로 자계가 세어질수록 전자는 자계때문에 운동이 구속되고 프로브에 유입되는 전류가 억제된다.^{8,9)} 더우기, 고자계하에서도 프로브에 유입되는 전자는 이러한 자계구속에 이길 수 있는 고속

열전자에너지로서 구성되기 때문에 프로브에 유입되는 전자의 평균 T_e 는 증가하게 된다. 그 결과 식(2)에서 N_e 는 감소하게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지금까지 수동방식으로 플라즈마 파라메타를 측정했던 Langmuir 프로브 방식이 가진 여러가지 문제점을 개선하기 위하여 가격이 저렴하고, 간단하며, 고속으로 프로브 특성측정이 가능한 프로브 구동회로를 제안하였다. 이 구동회로는 최대 +30 V의 톱니파 전압 파형을 정확히 발생할 수 있으며, 전류용량은 수 A에 이를 뿐만 아니라 스위프 시간은 1 ms 이내로서 고속구동이 가능하다. 특히, 이 구동시스템과 저장형 OSC의 X-Y 모드와 결합함으로써 플라즈마 파라메타의 결정에 필요한 프로브 전압-전류특성을 OSC 상에 고속으로 구현 및 저장할 수 있게 하였다.

본 연구에서 제안한 고속 프로브 구동시스템을 Ar 직류플라즈마에 적용하여 플라즈마 파라메타를 구한 결과는 종래 수동방식의 결과와 잘 일치하였다. 특히, 이 시스템은 프로브의 오손 및 플라즈마 변동에 신속 대응할 수 있어 직류플라즈마 뿐만 아니라 펄스 플라즈마나 변동이 심한 플라즈마 파라메타 측정에 특히 유용할 것으로 생각된다.

※ 이 연구의 일부는 1995년도 동의대학교 자체 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. 플라즈마핵융합學會編, “플라즈마 診斷의基礎” 名古屋大學出版會, 第2章, 1990
2. Michael S. Barnes et al, “Electron energy distribution function measurements in a planar inductive oxygen radio frequency glow discharge”, Appl. phys. Lett., vol. 62, 2622-2624, 1993.
3. S. Yamaguchi et al, “Variation of Ion Current Floating into Double probes with Coating of Organic Thin Film in rf Discharge plasma”, Japan J. Appl. Phys., vol. 26, 728-733, 1987
4. H. Shindo et al, “Emissive probe measurement of electron temperature in high-pressure plasma”, Rev. Sci. Instrum., vol. 59, 2002-2007, 1988

5. 김용주 외, "이온빔 발생을 위한 ECR 시스템 개발", 한국전기연구소 과학기술처 2차년도 연구 보고서, 1993
6. F. Fujita et al, "Quick Measurement and Digital Data Handling for Langmuir Probes", J. Appl. Phys., vol. 27, 1447-1481, 1988
7. S. Cartier et al, "Wide-range Langmuir probe sweep circuit", Rev. Sci. Instrum., vol. 54, 1789-1790, 1983
8. I. H. Hutchison, "Principles of Plasma Diagnostics", Cambridge University Press, Chapter 3, 1987
9. R. H. Huddleston and S. L. Leonard, "Plasma Diagnostic Techniques", Academic Press, Chapter 4, 1965

저자소개



신중홍

1943년 3월 8일생. 1971년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1981년 동의공업전문대 교수. 1992년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년-현재 동의대학교 전기공학과 조교수.



고태언

1942년 3월 18일생. 1966년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동아대 전기공학과 졸업(석사). 1994년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 동의대학교 전기공학과 교수.



김두완

1961년 4월 13일생. 1988년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 재학중.



박정후

1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1968년-71년 한국전력. 1974년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1975년-88년 부산수산대학교 부교수. 1980년-84년 일본 Kyushu대학 졸업(공학) 1988년 현재 부산대학교 전기공학과 교수.