

## 400kHz 페라이트 유도결합 플라즈마를 위한 임피던스 매칭 네트워크

조성원, 방진영, 이영광, 정진욱\*

\*서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 전기공학과

### 초록

현재 반도체 산업에서 플라즈마는 다양한 공정에 적용되고 있으며, 고집적 대면적 공정을 위한 다양한 플라즈마원들이 개발 중에 있다. 이 중 ICP는 현재 고밀도 플라즈마를 요구하는 공정에서 널리 쓰이고 있는 플라즈마원이다. 그러나 ICP는 안테나와 플라즈마 사이의 결합이 낮아 안테나의 전압과 전류가 높으며, 대면적에 적용하기 어려운 디자인 등의 여러 가지 문제점들을 가지고 있는데, 이러한 ICP의 문제를 해결하기 위한 방법으로 강자성체를 ICP에 응용하는 플라즈마원이 연구되어 왔고 일부 장치에 쓰이고 있다. 이것은 ICP의 많은 문제들을 해결하면서도 여러 가지 장점을 가지는 것으로 평가되고 있다. 강자성체를 이용한 ICP는 플라즈마와 안테나의 결합계수가 1에 가깝기 때문에 강자성체 ICP에서는 간편한 변압기 임피던스 매칭이 적용 가능하다. 이 논문에서는 릴레이를 이용하여 변압기의 권선수를 제어하는 방식을 통해 새로운 임피던스 매칭이 제안되었다. 간단한 매칭 시스템을 구현하여 권선비가 바뀌었을 때 특성을 분석하였다. 2-채널 릴레이를 사용할 때 임피던스 매칭이 가능하였고, 디지털 회로와 마이크로컨트롤러를 사용하여 디지털 임피던스 매칭 시스템을 구현하였다.

### 1. 서론

저온 플라즈마는 반도체 산업분야에 널리 이용되고 있으며 특히 고집적 대면적 공정을 위해 다양한 플라즈마 원들이 개발되고 있다. [1] 그 중 유도 결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma, ICP)는 높은 밀도를 요구하는 플라즈마 공정에 많이 사용되고 있다. 최근 활발히 연구되고 있는 저주파 페라이트(Ferrite) ICP는 대면적 반도체 공정을 위해서 개발된 플라즈마 원 중 하나이다.

페라이트 ICP는 기존의 ICP에 비해 안테나 전류가 감소하고, 전력전달 효율이 증가하는 장점을 가지고 있다. 그리고 최근 연구에서는 페라이트의 구조에 따라서 높은 플라즈마 밀도와 균일도를 보여 주었다. [2]

플라즈마를 이용하는 반도체 공정에서 가장 중요한 부분 중 하나가 임피던스 매칭 네트워크(Impedance Matching Network)이다. 실제 반도체 공정 중 가장 많이 발생하는 오류 중 하나는 RF Generator가 플라즈마원으로 전력을 전달하는 과정에 임피던스 매칭(Impedance Matching)이 맞지 않아서 일어나는 경우이다. 일반적인 ICP매칭의 경우 다수의 가변공기축전기(Air Variable Capacitor, AVC) 혹은 가변진공축전기(Vacuum Variable Capacitor, VVC)를 사용하는 방식이다.[3] 그리고 ICP 안테나의 구조와 RF Generator의 구동주파수에 따라서 가변 인덕터 혹은 변압기를 필요에 따라 사용하고 있다. 특히 AVC나 VVC를 사용하는 경우에는 DSP등을 이용한 스텝 모터 제어를 통해 공정 환경에 따라서 자동으로 매칭 포인트를 찾아 축전기의 값을 조정하는 자동정합을 적용하고 있다. [4]

한편으로 저주파 페라이트 ICP에서는 안테나와 플라즈마의 결합계수가 거의 1에 가깝고, 유도결합된 임피던스의 저항성분이 리액턴스 성분을 무시할 수 있을 정도로 크기 때문에 기존의 방식과 다르게 간편한 변압기 매칭을 이용할 수 있다. 기존의 변압기 매칭방식은 수동으로 권선을 조정해야 하므로 입력전력이 증가함에 따라 같이 증가하는 Reflected Power를 줄이기 위해 RF Generator에서의 전력전달을 멈추고 플라즈마를 끈 다음 변압기의 권선을 조절한 후 다시 전력을 인가하여 플라즈마를 켜는 번거로운 방식이었다.

본 논문에서는 고속의 릴레이 스위칭 회로를 이용하여 변압기 권선을 제어하는 방식을 적용하여 플라즈마가 유지되면서 동시에 임피던스 매칭을 할 수 있는 방법과 디지털 회로와 마이크로컨트롤러를 이용하여 간단히 제어되는 디지털 임피던스 매칭 네트워크를 제시하였다.

## 2. 이론

### 2.1 ICP에서의 임피던스 매칭

ICP는 그림1과 같이 저항과 유도성 성분으로 모델링 할 수 있다. [5] ICP는 전력이나 공정압력에 따라 유도결합의 정도가 바뀌게 되고, 이에 따른 임피던스의 변화에 맞게 임피던스 매칭 해야 한다.

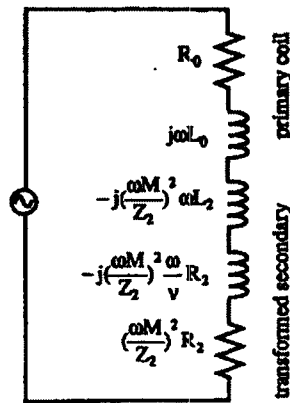


Fig. 1. The Equivalent circuit of an inductively coupled discharge.

대부분의 RF Generator는 출력 임피던스가 산업기준 따라 50Ω에 맞추어져 있다.[4] 매칭 네트워크의 역할은 플라즈마와 안테나가 가지고 있는 저항성, 용량성 혹은 유도성 특징들을 50Ω으로 변환해주는 것이다.

그림 2는 그림 1과 같은 ICP에 적용되는 매칭 네트워크의 개략적인 회로이다.

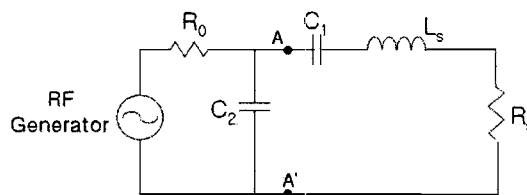


Fig. 2. Schematic of matching network for ICP

$R_s$ ,  $L_s$ 는 안테나와 플라즈마의 유도결합으로 생긴 저항과 인덕턴스,  $R_0$ 는 RF Generator의 출력 임피던스이고  $C_1$ ,  $C_2$ 는 매칭 네트워크에 사용되는 축전기 이다.

A-A' 우측의 어드미턴스는,

$$Y_A \equiv G_A + jB_A = \frac{1}{R_s + j(X_1 + X_s)} \quad (1)$$

$G_A$  : 컨덕턴스  $B_A$  : 서셉턴스

$X_1$  :  $C_1$ 의 리액턴스  $X_s$  :  $L_s$ 의 리액턴스

로 나타낼 수 있다.

여기서 임피던스 매칭이 이루어 지려면,

$$G_A = \frac{1}{R_0} \quad B_A = -\omega C_2 \quad (2)$$

와 같은 임피던스 매칭 조건을 만족 해야 한다. 즉, 가변축전기  $C_1, C_2$ 를 이용하여 임피던스 매칭을 하는 방식이다. [3]

### 2.2 페라이트 ICP에서의 변압기 임피던스 매칭

페라이트ICP는 안테나와 플라즈마의 유도결합이 뛰어나기 때문에 변압기 임피던스 매칭을 사용할 수 있다.

그림 3은 개략적인 변압기 임피던스 정합의 모습이다. 부하의 임피던스는 권선비의 제곱에 비례하여 변환된다. [6]

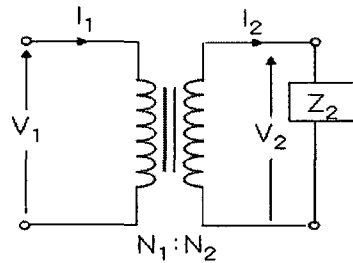


Fig. 3. Ideal transformer.

$$Z_1' = \frac{1}{a^2} Z_2 = Z_2 \quad a = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

$a$  : 1차측에 감긴 권선과 2차측에 감긴 권선의 비  $Z_1$  : 1차측의 임피던스  $Z_2$  : 2차측의 임피던스

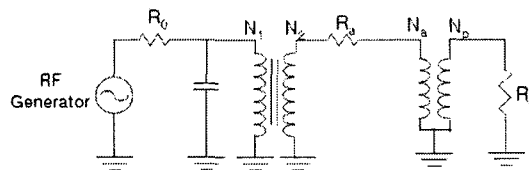


Fig. 4. Schematic of transformer matching for ICP

이것을 페라이트ICP에 적용한 것이 그림4이다. 그림4에서  $R_p$ 는 플라즈마가 가지는 저항성분이고  $R_a$ 는 안테나가 가지는 저항성분이다.  $N_a$ 와  $N_p$ 로 표시된 부분은 안테나와 플라즈마의 유도결합을 나타낸 부분이다. 이 부분의 합성저항을 안테나 측에서 바라본다면 식(1)에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_L = R_a + a'^2 R_p \quad (4)$$

$a'$ : 안테나와 플라즈마의 유도결합 권선비

$R_L$ : 유도결합 플라즈마의 저항

여기서 RF Generator의 출력 임피던스를  $R_0$ 라 하면,  $N_1, N_2$ 로 표시되는 변압기를 사용하여

$$R_0 = a^2 R_L \quad (5)$$

이와 같은 임피던스 매칭 조건을 만들 수 있다. 위 식에서 플라즈마 조건에 따라 변하는 것은  $R_p$ 이고  $a'$ 와  $R_a$ 는 변하지 않으므로  $a$ 를 조절할 수 있다면 임피던스 매칭이 가능하다.

이러한 변압기 임피던스 매칭은 간단한 매칭 방법으로 특히 1MHz이하의 주파수에서는 가장 적합하게 응용되고 있다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 페라이트 ICP의 구성

페라이트 ICP는 페라이트의 높은 상대투자율에 의해 유도되는 전기장을 이용하기 위해 기존 ICP 시스템에 페라이트를 응용한 ICP이다.

페라이트에 코일을 감는 방식에 따라 유도되는 전기장과 자기장의 방향이 바뀌는데, 이는 그림5에 나타내었다. 그림 5. (a)는 페라이트에 안테나 코일을 감은 형태이고 그림5. (b)는 페라이트와 동심원 형태의 안테나 위에 페라이트를 올려놓은 형태이다. 그림5. (a)의 경우 유도되는 전기장은 페라이트 내부 원을 통과하는 방향이고, 그림5. (b)의 경우 페라이트와 동심원 형태로 전기장이 유도된다. [7]

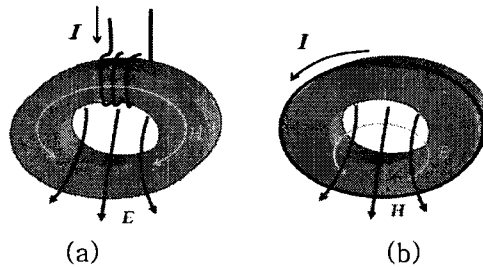


Fig. 5. The electric field and magnetic field distribution.

#### 3.2 변압기 매칭 네트워크

변압기 매칭 네트워크는 변압기와 고정세라믹 축전기로 이루어져 있다. 플라즈마 공정에서 안테나와 플라즈마의 임피던스는 전력과 공정압력에 대하여 변화하므로 매칭 네트워크도 연속적으로 동작할 수 있어야 한다. 개략적인 구성을 그림 6에 나타내었다.

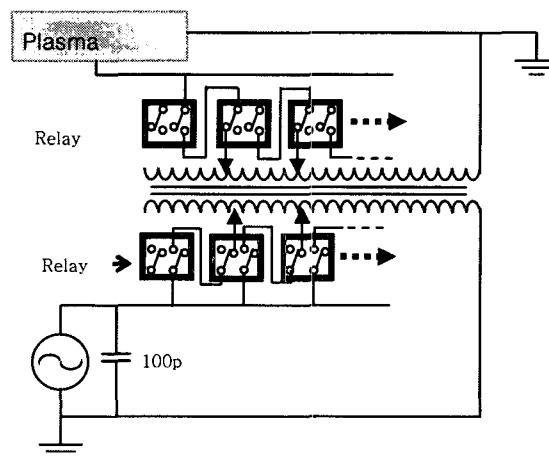


Fig. 6. The schematic of the transformer matching network.

플라즈마를 유지시키기 위해서는 출력부의 전압강하를 방지하기 위해 오직 하나의 릴레이에만 전력이 전달될 수 있도록 설계되어야 한다.

그림 6의 회로는 2-채널 릴레이를 사용하여 변압기 권선제어를 위해서 릴레이를 켜는 순간, 이전에 결선된 부분을 개방 상태로 만들면서 동시에 해당되는 권선에 전력이 전달될 수 있게 설계되었다.

릴레이는 12V의 직류전원으로 구동되고 최대10A의 교류전류를 견딜 수 있다. 전용소켓에 연결하여 손상이 발생했을 경우 교체가 쉽도록 하였다. 변압기에 사용된 강자성체는 페라이트ICP에 사용된 페라이트와 자기적 특성과 주파수 특성이 같은 강자성체를 사용하였다. 페라이트에 감은 전선은 최대 10A의 전류를 흘릴 수 있는 연선을 사용하였고 1차측과 2차측에 각각 22번씩 감았다. 그리고 16개의 탭을 만들어 릴레이와 연결할 수 있도록 제작 하였다. 플라즈마와 안테나의 유도결합이 충분하지 않을 때에 임피던스에 생길 것으로 예상되는 유도성분배에 대비하여 RF Generator와 변압기 사이에 100pF의 고정형 세라믹 축전기를 병렬연결 하였다.[8]

### 3.3 디지털 매칭 네트워크

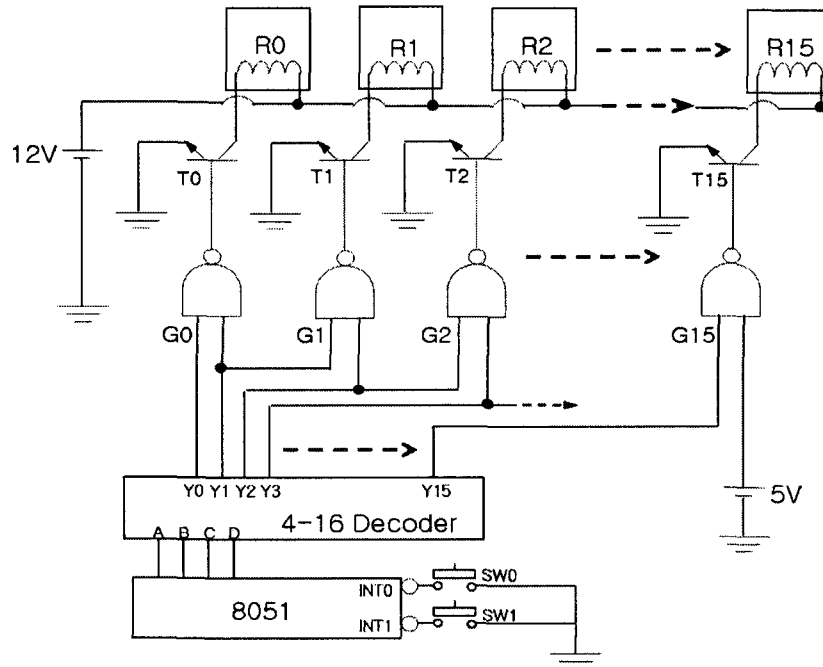


Fig. 7. The schematic of the Digital Circuit of the transformer matching network.

디지털 매칭 네트워크는 변압기 권선을 제어하는 릴레이의 동작을 마이크로컨트롤러, 트랜지스터, TTL Gate소자 그리고 4-16 디코더를 이용하여 제작하였다. 수동으로 스위치를 바꾸면서 구동할 경우는 다량의 토글스위치를 연결하여 일일이 조작해야 하는 번거로움이 있었다. 하지만 디지털 매칭 네트워크는 마이크로컨트롤러의 외부 인터럽트 기능, 트랜지스터의 스위칭 기능 등을 이용하여 한 번의 스위치 조작으로 변압기의 권선을 증가 혹은 감소할 수 있는 매칭 네트워크 이다. 토글스위치로 구동되는 매칭 네트워크와 같이 플라즈마를 잘 유지 시키면서 변압기의 권선을 바꿀 수 있는 스위칭을 하기 위해서 NAND 게이트가 사용되었다. 디지털 매칭 네트워크의 개략적인 모습을 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 마이크로컨트롤러의 Fresh ROM에는 외부인터럽트0(INT0) 가 폴링엣지트리거 되면 병렬포트 1의 출력의 16진수가 감소되고, 외부인터럽트1(INT1) 가 폴링엣지트리거 되면 병렬포트 1의 출력이 증가하게 되도록 프로그램 되어있다.

4-16 디코더는 이러한 마이크로컨트롤러 포트의 디지털 신호를 A, B, C, D로 입력 받아 Y0, Y1, ~ Y15 을 그림 8의 진리표와 같이 출력한다. 4-16 디코더의 Y0, Y1, ~ Y15에 의해 순차적으로 출력된 디지털 신호는 NAND 게이트인 G0, G1, ~ G15로 입력된다. 마이크로컨트롤러의 포트의 출력이 16진수 0부터 F 까지 출력될 경우 NAND 게이트의 출력을 그림 10에 나타내었다.

A	B	C	D	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	H	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H
H	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H
H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H
H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H
H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

Fig. 8. The True table of 4-16 Decoder.

A	B	C	D	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15
L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	L	H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	L	H	H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	H	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	H	L	H	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L
L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L
H	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L
H	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L	L
H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L	L
H	H	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L	L
H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	L
H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H

Fig. 9. The Output of NAND Gates of Digital Impedance Matching Circuit

그림 8의 마이크로컨트롤러의 Fresh Rom에는 외부인터럽트0(INT0)가 폴링엣지트리거 되면 병렬 포트 1의 출력의 16진수가 감소되고, 외부인터럽트1(INT1)가 폴링엣지트리거 되면 병렬포트 1의 출력이 증가하도록 프로그램 되어있다.

4-16 디코더는 이러한 마이크로컨트롤러 포트의 디지털 신호를 A, B, C, D로 입력 받아 Y0, Y1, ~ Y15를 그림 9의 진리표와 같이 출력한다. 4-16 디코더의 Y0, Y1, ~ Y15에 의해 순차적으로 출력된 디지털 신호는 NAND 게이트인 G0, G1, ~ G15로 입력된다. 마이크로컨트롤러의 포트의 출력이 16진수 0부터 F까지 출력될 경우 NAND 게이트의 출력을 그림 9에 나타내었다.

그림 9는 2개의 High 디지털 신호가 순차적으로 같이 움직이고 있는 것을 보여준다. 이외같이 동작

할 경우 NAND 게이트의 출력단에 연결된 트랜지스터의 베이스에 역시 2개의 High 디지털 신호를 주게 된다. 디지털 매칭 네트워크에 사용된 트랜지스터는 NPN타입의 바이폴라 접합 트랜지스터로 12V의 직류전원과 릴레이의 전원 인가부 그리고 접지 사이에 그림 7과 같이 연결하여 스위치와 같은 역할을 하고 있다. 만약 트랜지스터의 베이스에 High 디지털 신호가 인가되면 트랜지스터는 공통 에미터 모드로 동작하여 컬렉터에 연결된 릴레이는 구동되게 된다.

여기서 2개의 릴레이를 동시에 켜는 것이 플라즈마를 유지하면서 변압기 권선을 바꿀 때 가장 중요한 부분이다. 2개의 릴레이를 위와 같이 동시에 구동함으로써 앞에서 구현했던 수동형 임피던스 매칭 네트워크의 동작을 완전히 디지털화 할 수 있었고 마이크로컨트롤러에 연결된 4개의 스위치로 변압기의 모든 권선을 제어할 수 있었다. 이러한 시스템의 디지털화는 매우 빠른 임피던스 매칭을 가능하게 한다.

회로에 사용된 마이크로컨트롤러는 Atmel사의 AT89C2051을 사용하였고 4-16 디코더는 TI사의 74HC154를 사용하였다. 릴레이와 NAND게이트 사이에 연결된 트랜지스터는 ON -Semiconductor사의 2n2222a를 사용하였다.

### 3.4 실험장치

페라이트 ICP와 디지털 매칭 네트워크를 결합한 실험장치의 개략적인 모습을 그림10에 나타내었다.

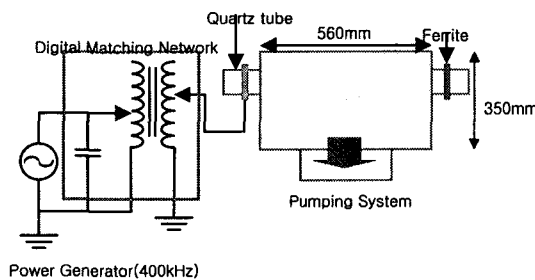


Fig. 10. The schematic of the experimental setup.

챔버는 지름 560mm, 높이 350mm로 제작되었다. 챔버의 옆 부분으로 가스가 주입되며 아래 부분으로 가스의 배기가 이루어 진다. 로터리 오일 펌프(Rotary Oil Pump)로 먼저 배기하고 터보 분자펌프(Turbo Molecular Pump)로 고진공 상태를 유지한다. 가스는 아르곤(Argon)을 사용하였고 질량유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 가스의 주입량을 조절한다. 400kHz의 RF Generator를 사용하여 전력을 공급하고 챔버와 RF Generator사이에 매칭 네트워크를 연결하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 변압기 임피던스 매치의 동작

그림11은 그림6와 같은 매칭 네트워크에 정현파를 인가하고 권선비 변환을 위해 릴레이를 켜는 때 변압기2차측 출력의 변화를 오실로스코프로 측정된 것이다. 그림6의 회로와 같이 2-채널 릴레이를 사용하여 한 개의 릴레이에서 결선의 개방과 단락을 동시에 하기 때문에 스위칭 순간에 신호가 끊어지지 않고 계속 유지될 수 있었다.



Fig. 11. The output signal when relay is turned on.

하지만 스위칭을 하는 순간 기존 출력의 2배에 달하는 출력이 순간적으로 나타났다. 이런 현상은 스위치가 단락 되는 순간에 발생하는 아크 혹은 다른 과도현상에 의해 생기는 큰 전압이 2차측에 출력 되는 것으로 여겨진다.

#### 4.2 페라이트ICP의 적용

5mTorr, 10mTorr의 압력과 150W~2000W의 전력에서 변화하는 플라즈마 환경에 대한 변압기의 권선비를 조사하였다.

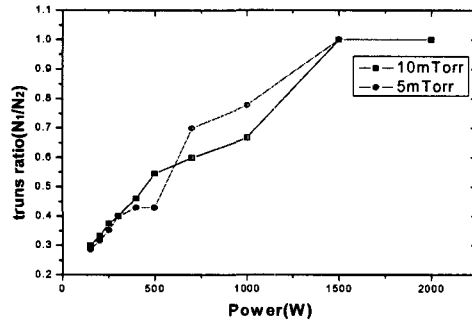


Fig. 12. The turns ratio of Transformer

그림 12에서 전력이 커지면서 권선비가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 전력이 높아지면서 안테나와 플라즈마의 유도결합의 정도에 의한 저항성분의 감소로 권선비  $a$ 가 식(3)에 의해서 커지는 것이다.

저주파에서 사용되는 만큼 안테나에 걸리는 전압과 전류 사이의 위상 차  $\theta$ 에 의한 Reflected Power의 발생은 그리 크지 않다. 하지만 그림 13과 같이 전달하려는 전력이 증가함에 따라 Forward Power에 대한 Reflected Power의 비가 점점 증가하는 것을 관찰 하였다. 이는 전력이 커지면서 전자관성에 의한 인덕턴스의 변화로 인해 안테나와 플라즈마가 가지는 리액턴스의 특성이 바뀌지만 매칭 네트워크에 연결된 병렬 축전기가 100pF으로 고정되어 있어서 위상 차 발생에 의한 임피던스 내의 복소성분을 보정하지 못하는 것으로 생각된다.

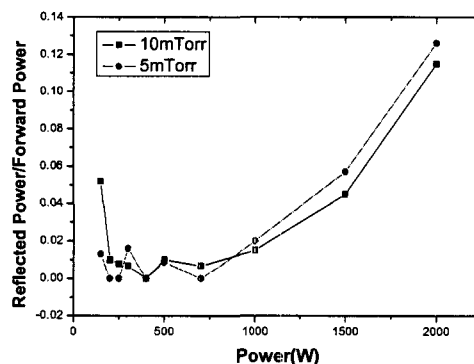


Fig. 13. The ratio of reflected power and forward power

## 5. 결론

페라이트 ICP에 적용한 변압기 매칭 네트워크는 기존의 수동으로 권선을 조절하는 매칭 시스템에 비하여 간편하게 제작하고 빠르고 정확하게 구동할 수 있었다. 그리고 2-채널 릴레이를 이용하여 새로이 설계된 변압기 권선 제어회로를 사용할 때 플라즈마가 유지되면서 임피던스 매칭을 할 수 있었다. 150~1000W의 범위에서 Reflected power를 무시해도 좋을 만큼 정확하고 넓은 범위의 임피던스 정합을 보여주었지만 그 이상의 전력에서는 Forward power에 비해 Reflected power가 점점 증가해



서 효과적으로 임피던스 매칭이 이루어지지 않았다.

그림 6 에서의 고정 세라믹 축전기를 가변진공축전기 혹은 다른 소자로 바꾸고 변압기 권선을 더 효율적으로 감는다면 더 높은 전력에서도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

그리고 마이크로컨트롤러와 디지털회로를 이용하여 트랜지스터로 릴레이를 구동하는 간편한 디지털 임피던스 매칭 시스템을 구현할 수 있었다. 아주 빠른 디지털 신호로 릴레이가 제어되므로 높은 속도의 임피던스 매칭을 할 수 있었고, 마이크로컨트롤러에 연결된 4개의 스위치로 변압기의 모든 권선을 제어할 수 있었다. 더욱이 Phase-Magnitude Detector(PMD)를 이용하면 고속의 자동 매칭도 가능할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [1] Alfred Grill, 정진욱 옮김, 공정 플라즈마 기초와 응용, 청문각, 2003.
- [2] V. A. Godyak and C. W. Chung. "Distributed Ferromagnetic Inductively Coupled Plasma as an Alternative Plasma Processing Tool" Japanese Journal of Applied Phys, 45, 8035(2006)
- [3] M. A. Lievermann and A. J. Lichtenberg "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", 2<sup>nd</sup> edition. Wiley, New York, 1994.
- [4] Louis E. Frenzel, Jr. "RF Power for Industrial Applications", Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [5] R. B. Piejak, V. A. Godyak and B. M. Alexandrovich "A simple analysis of an inductive RF discharge." Plasma Source Sci. Technol.,1(1992)pp.179-186
- [6] Paresh C. Sen "Principles of Electric Machines and Power Electronics" 2<sup>nd</sup> edition. Wiley, New York, 1997.
- [7] 이원기, 이경효, 정진욱. "13.56MHz 유도결합 플라즈마에서의 강자성체 페라이트 코어의 효과", 반도체디스플레이장비학회지, 제4권, 제3호, pp.35-38,2005.
- [8] K. H. Lee, T. K. Lee, S. W. Cho and C. W. Chung, "Electrical and plasma parameters of side type ferromagnetic ICP", Gases Electronics Conference 59<sup>th</sup>(2006,U.S.)