

## 기체레이저의 여기를 위한 용량결합고주파(ccrf) 방전시스템

(Capacitively Coupled Radio Frequency Discharge System for Excitation of Gas Laser)

최상태\*

(Sang-Tae Choi)

### 요 약

용량결합고주파(ccrf)방전은 홀로우음극방전이나, 직류방전에 비해서 방전관의 구조가 간단하고 균질한 플라즈마를 발생시키는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 ccrf-방전을 기체레이저의 여기에 적용하기 위한 목표를 가지고 방전시스템을 설계, 제작하여 연속운전의 균질한 방전을 실현하였다. 13.56[MHz]의 rf-전력을 방전 내부로 효율적으로 결합하기 위해서 내부직경 5[mm]의 레이저방전관에 특수하게 제작된 rf-전극을 사용하였다. 또한 방전관의 임피던스가 rf-발생기의 출력저항 50[Ω]에 정합을 이루는 임피던스 정합회로를 개발하였다.

### Abstract

The ccrf-discharge has in comparison with the hollow-cathode discharge and DC-discharge some advantages: Simple design of the tube and homogeneous plasma. The ccrf-discharge was researched with the goal, to use on the excitation of the gas laser. In this work a rf-exciting system was planned and developed. With it a homogeneous discharge was produced in the cw operation. To supply the rf-power with the frequency 13.56[MHz] effectively in the discharge, laser tube were used with inner diameter of 5[mm] and the specially developed rf-electrodes. A matching circuit was composed also. Thereby the impedance of the discharge tube was adjusted to the 50[Ω] output resistance of the rf-source.

Key Words : ccrf-discharge, gas laser, rf-electrode, matching circuit

### 1. 서 론

홀로우음극방전을 사용하는 기체레이저는 가시광과 적외선영역 뿐만 아니라 자외선영역까지도 레이저선들을 방출하고 있으나 제작이 까다롭고 레이저수명

이 짧아 실제적인 응용에는 문제점을 드러내고 있다.

한편으로 방전관 외부에 간단하게 전극을 배치하고 고주파를 사용하여 레이저플라즈마를 발생시키는 용량결합고주파(ccrf, capacitively coupled radio frequency)방전은 통상적인 홀로우음극방전이나, 직류방전에 비해서 방전관의 구조가 간단하고 균질한 방전플라즈마를 발생시키는 장점을 가지고 있다. 또한 매우 안정되고 소음이 없는 플라즈마를 형성하며, 전극간의 거리가 짧고 그로인해 낮은 방전전압이 그 특징이다. ccrf-방전으로 여기되는 레이저는 고주파

\* 주저자 : 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 조교수  
Tel : 054-770-5180, Fax : 054-744-5295

E-mail : stchoi@gjw.ac.kr  
접수일자 : 2005년 11월 14일  
1차심사 : 2005년 11월 21일  
심사완료 : 2005년 12월 12일

방전관을 사용하므로 수명이 현저히 길어질 뿐만 아니라 홀로우음극방전에서 발전하는 거의 모든 레이저선들을 발전시킬 수 있다. 또한 화학적 반응이 문제가 되는 물질도 레이저매질로 사용가능하다[1].

본 논문의 주된 연구목적은 연속파레이저의 rf-여기를 위해서 신뢰할 수 있는 용량결합고주파방전기술을 실현하는 것이다. 연구목적의 설정으로부터 연속적으로 도달되어야 하는 다음 3가지 즉, 균질한 ccrf-방전의 실현을 위한 rf-전극의 개발 및 방전에 적합한 레이저관의 선택과 임피던스정합회로의 개발이라는 목표를 가지고 있다.

## 2. ccrf-방전의 특성

ccrf-방전의 기본원리는 그림 1에 따라 설명된다. rf-전력은 유전체 방전용기의 외부에 설치된 전극을 통해서 공급된다.  $x=0$  와  $x=x_0$ 의 위치에 방전용기의 벽이 있으며  $y$ 축 상으로는 시간에 따른 전자운의 진동이 확대되어 표시되어있다. 질량이 큰 이온들은 rf-교류장에 영향을 받지 않고 위치가 고정된 것으로 간주한다. 1회 진동 주기마다 전자운이 한 번씩 양쪽 용기벽에 접촉하고 이때 벽과 충돌한 전자들은 그곳에 축적된다. 전자운이 벽에서 멀어지면 음전하로 대전된 벽 앞에 양의 공간전하 영역이 생긴다. 이로 인하여 벽 쪽으로 향하는 직류전계가 양쪽 벽 앞에 각각 형성된다. 전계  $E =$ 은 시간적인 평균값으로 주어지며, 직류장 내에서 이온들을 벽 쪽으로 가속시킨다. 벽에 충돌한 이온들은 2차 전자를 방출하고 벽으로부터 유전체 물질들을 스퍼터링한다. 2차 전자들은 주기적으로 변화하는 전계를 따라 방전중심부로 가속되고 그곳에서 무거운 기체입자들과 충돌하여 여기시키거나 이온화시킨다[2].

경계층인 공간전하영역에서 형성되는 높은 전계는 큰 에너지의 전자들을 생성한다. 이 전자들은 충전기체내에서 많은 원자들을 이온화시킬 수 있다. 이 이온들은 전하이동충돌 혹은 페닝충돌을 거쳐 레이저발전과정에 투입된다. 경계층에 있는 전자들의 진동폭은 상대적으로 작기 때문에 플라즈마는 방전 단면 전체적으로는 중성이다.

ccrf-방전은  $\alpha$ -방전과  $v$ -방전으로 구분된다[3].  $\alpha$ -방전은 전류밀도가 낮은 특성이 있다.  $\alpha$ -방전에서는

경계층으로의 전류공급은 압도적으로 변위전류에 의한 것이다.  $v$ -방전에 있어서 경계층으로의 전류공급은 단지 변위전류에 의해서 만이 아니라 전도전류에 의해서도 공급된다. 전자들이 벽에 축적되고 벽으로부터 방출되기 때문이다.

본 논문의 ccrf-방전은 전류밀도가 높은  $v$ -방전과 유사하다. 플라즈마방사의 광강도는 낮은 압력에서는 먼저 방전중심부에 집중된다. 압력을 높이면 광강도는 양쪽 벽 앞쪽에 두 개의 밝은 영역으로 나누어지고 중심부에는 어두운 영역이 나타난다. 이는 직류방전에서의 부글로우와 파라데이암부와 비교된다[4].

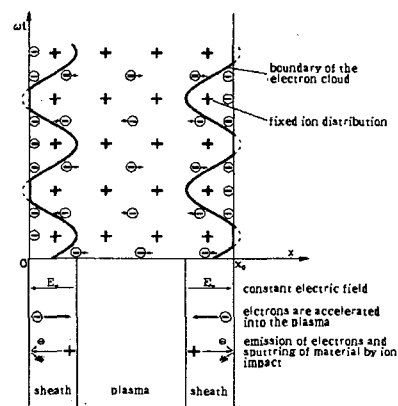


그림 1. ccrf-방전의 개념도  
Fig. 1. Basic processes in the ccrf discharge

홀로우음극방전에서는 많은 양의 음극물질이 스퍼터링되기 때문에 레이저의 수명이 짧다. 제어할 수 없는 음극물질들이 부루스터 창문이나 다른 장소에 침착됨으로써 큰 문제를 일으키기 때문이다. ccrf-방전에는 홀로우음극방전과 유사한 방전조건들이 지배하고 있다. 그 이유는 두 방전의 전극 앞부분에 양의 공간전하층이 형성되는데 있다. ccrf-방전과 홀로우음극방전의 유사성은 각각의 방전형식으로 여기되는 He-Cd<sup>+</sup>-이온레이저가 동일한 특성을 나타내는 데에서 찾을 수 있다[5]. ccrf-방전과 홀로우음극방전은 최적화된 레이저운전에서 동일한 특성을 나타내므로 홀로우음극방전 레이저들은 ccrf-방전에서 근본적으로 모두 실현될 수 있다. 일반적으로 ccrf-방전여기의 레이저관은 제작이 용이하고 홀로우음극레이저보다 문제발생이 적다.

### 3. 균질한 ccrf-방전의 실현

안정되고 균질한 방전을 위해서 전자적합성(EMC)을 고려하여 공업용으로 할당된 ISM(산업, 과학, 의학)주파수인 13.56[MHz]를 사용하였다. 다른 주파수들, 예를 들어 27.12[MHz] 혹은 40.68[MHz]도 역시 가능하다. 이들은 차폐의 문제를 해결하는데 다른 주파수 보다 수월하게 대비책을 세울 수 있으며 rf-발생기도 저렴하다.

레이저의 여기를 위해서는 먼저 방전관 안으로 rf-전력이 효과적으로 결합되어야 한다. 또한 홀로우음극방전의 특성을 가진 균질한 형태의 방전이 생성되어야 한다. 이때 다음과 같은 문제점들이 대두된다. 즉 rf-전극의 개발, 방전관의 선택 및 정합회로의 개발이다.

#### 3.1 rf-전극의 개발

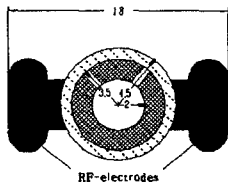


그림 2. 방전관과 rf-전극  
Fig. 2. Discharge tube and rf-electrodes

rf-전력을 레이저플라즈마 내부로 결합시키기 위해서 방전관에 전극을 부착해야 한다. 길이 400[mm], 폭 4[mm]인 두 개의 전극을 방전관의 양쪽에 길이로 부착하였다. 그림 2는 전극이 부착된 방전관의 단면을 나타낸다. 방전관의 길이를 따라 온도를 끝고루 분포시키는 전극은 훌륭한 열전도체로서의 역할을 한다. 최고의 열전도성을 가진 4가지 금속(금, 은, 구리, 알루미늄) 중에서 전극의 높은 온도와 가격을 고려하여 최적의 조건을 갖춘 구리 전극을 채택하였다.

전극표면의 온도는 450[°C]까지 도달하였다. 방전관 접촉면의 폭이 단지 4[mm]이지만 전극이 훌륭한 열유도체의 역할을 하기 위해서 접촉면의 반대편은 상대적으로 큰 물체를 가지고 있다. 외부 표면을 확대시킴으로써 더 나은 열방사가 가능하였다. 전계의 상승에 의한 섬락을 피하기 위해 전극의 상하 끝부분과 다른 모든 방향의 모서리도 가능한 원형으로 마무리 하였다.

높은 온도에서 생기는 표면의 그을음 방지를 위하

여 완성된 구리전극에 화학적으로 니켈도금을 하였다. 전류가 흐르지 않는 니켈욕조에서 전극표면에 두께 수[μm]의 니켈을 입혔다. 화학적인 방법의 니켈도금은 전기분해법 보다 도금층의 두께를 더 균일하게 만들 수 있다. 이 방법에 의하면 미세구멍이 없고 부식에 안정적이며 또 납땀이 잘된다. 균일한 니켈도금층은 금속표면에 돌출부가 생기는 것을 방지한다. 니켈도금을 한 구리전극의 사용으로 두 금속의 장점들이 가장 적절하게 결합되었다.

전극을 방전관에 고정시키는 데는 도자기로 만든 집계를 사용하였다. 집계는 불에 구운 스테난을 사용하였으며, 이것의 주성분은 규산알루미늄(AISiO2)으로 이루어져 있다.

#### 3.2 방전관의 선택

적절한 직경의 방전관을 선택하기 위한 실험에는 내부직경이 2.5[mm]에서 10[mm] 사이의 다양한 석영유리관을 사용하였다. 1[kPa]에서 10[kPa]사이의 헬륨압력을 단계적으로 방전관 내부에 공급하였다. rf-전력은 10[W]에서 200[W]까지 변화를 주었다.

이 실험에서는 방전중앙부에 부분적으로 어두운 영역이 관측되었다. 이 현상은 압력을 높임에 따라서 나타났으며 내부직경이 더 클수록 더 빨리 나타났다. rf-전력을 높여감에 따라 전극 앞부분의 밝은 영역이 방전중앙부로 점차 확장되면서 어두운 부분이 사라졌다. 최대 직경을 가진 관에서는 이 결과에 도달하지 못하였다. 균질한 방전에 도달하기 위해서는 중앙부에 어두운 영역의 출현은 억제되어야 한다. 이것은 관의 직경이 너무 커지 않아야 한다는 것을 뜻한다. 실험으로부터 관직경의 최대 허용치는 5[mm]를 얻었다. 이때 방전은 상대적으로 높은 압력에서도 방전관축의 횡방향으로 균질한 형태를 띠고 있었다. 헬륨-카드뮴레이저의 발전에 관한 참고문헌에 알려진 관직경은 2~6[mm]이다[6]. 기술적인 실현 가능성을 고려하여 본 논문에서는 방전관의 유효 길이를 최대 0.4[m], 내부직경 5[mm]로 개발하였다.

#### 3.3 임피던스정합회로

안정된 레이저운전을 위해서는 균질한 ccrf-방전이

레이저관내에 이루어져야 한다. 즉 레이저관의 임피던스가 rf-발생기의 내부저항값에 맞아야 한다(임피던스 정합). 낮은 주파수에서는 전류와 전압의 파장이 대단히 길기 때문에(50[Hz]에서  $\lambda=6 \cdot 10^6$ [m]) 전송선에서 일정하게 취급될 수 있지만, 높은 주파수에서는 전류와 전압이 더 이상 일정하지 않다. 임피던스 정합이 이루어지지 않으면 rf-전력의 반사손실이 많으며 또한 장시간에 걸쳐서는 rf-발생기에 손상을 가져올 수 있다. 진행파와 반사파의 중첩으로 정재파가 발생한다. 정재파측정기는 기준전압 혹은 전계의 최대 및 최소값을 측정하여 그로부터 SWR(standing wave ratio, 정재파비)을 계산한다. 임피던스정합의 정도는 운전 중에 진행파의 전력과 반사파의 전력을 동시에 표시하는 계측기로 조정된다.

연속운전하는 균질한 ccrf-방전이 되기 위해서는 rf-전원과 방전관 사이에 정합회로가 연결되어야 한다. 레이저 여기에 필요한 rf-방전시스템은 rf-발생기, 전력/SWR-측정기, 정합회로 그리고 전극이 연결된 레이저관으로 이루어진다(그림 3).

본 연구에서는 출력저항이 각각 50[Ω]인 Dressler사의 13.56[MHz] rf-발생기 두 대, MPG 1316(최대출력 1600[W])과 MPG 1307(최대출력 700[W])이 투입되었다. rf-전력 및 SWR의 측정에는 다음의 측정기들이 사용되었다. Daiwa사의 SWR & Power Meter NS-660P(측정범위 0~1500[W]) 및 Rohde & Schwarz사의 통과전력측정기 NAS(결합기 NAS-Z2 포함, 주파수범위 1-30[MHz], 측정범위 0-1200[W]). 개개의 기기들은 50[Ω]-케이블 및 N-플러그들로 연결되었다.

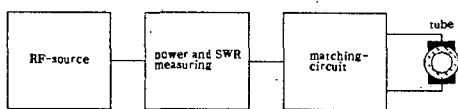


그림 3. ccrf-방전시스템  
Fig. 3. ccrf discharge system

정합회로는 방전에 효과적으로 rf-전력을 결합시키고 너무 높은 반사전력에 대해서 rf-발생기를 보호하는 역할을 한다. 이로써 관임피던스와 rf-전원의 50[Ω]-출력저항 사이에 정합이 이루어진다. 방전온도가 높아지면 자체임피던스가 변하기 때문에 정합회로는 일정한 범위 내에서 조정될 수 있어야 한다. 50[Ω] 이

하의 실수 저항값과 커패시턴스의 용량성리액턴스를 포함하는 방전관임피던스에는 소위 L-matching으로 불리는 회로가 정합회로로서 적합하다(그림 4). 커패시턴스로는 두 개의 공기가변콘덴서가 사용되었다.  $C_2$ 는 인덕턴스의 유도성리액턴스를 조정하는 역할을 한다. 공심코일의 인덕턴스는 코일권선의 연결위치를 변화시켜 대충의 값을 설정할 수 있다.

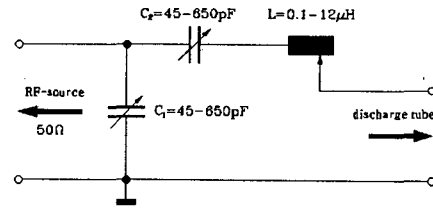


그림 4. L-matching의 회로 모델  
Fig. 4. Circuit model of the L-matching

L-matching 회로가 연결된 상태로 헬륨을 채운 레이저관에 균질한 ccrf-방전을 실현하기 위한 실험을 하였다. 방전은 전극구간을 넘어서 진공펌프에 연결된 유리관으로 이어졌다. 방전의 형성은 전극사이에서 전혀 균일하지 않았으며, 중앙부는 상대적으로 어둡고 관의 양쪽 끝으로는 더 밝았다. 이것은 rf-전류가 전극을 가로질러 골고루 분포되어 흐르지 않고 접지를 향하여 흐른다는 결론에 도달했다. 이는 비대칭의 동축케이블에서 대칭인 2선 전송선로로 넘어갈 때 나타나는 전류의 분기에 원인이 있다[7].

L-matching은 rf-전력이 레이저관 으로부터 반사되는 것을 억제하지만, 전류를 전극에서 접지쪽으로 흐르는 것을 억제할 수는 없다. 접지전류는 본래의 전극영역을 넘어서 방전을 형성하며 실험장치 주변의 전자기에 심한 장애를 일으킨다. 두 전극 간에 균질한 ccrf-방전을 실현시키기 위해서 대칭의 정합회로가 연결되었다. 이것의 접지는 가상적으로 전극사이의 중앙에 놓여 있다. 대칭적인 rf 공급을 통해서 균질한 ccrf-방전이 형성되고 이 방전은 단지 두 전극사이의 구간에서만 이루어졌다. 방전관의 길이 방향을 따라 생기는 전하의 확산과 전극영역 밖으로의 방전형성은 억제되었다. 대칭화 이후에는 전자기기에 대한 장애는 더 이상 발생하지 않았다.

대칭화를 위한 해결책으로 2개의 실린더형 코일변

압기를 사용하였다. 이 변압기에는 손실이 적은 높은 전류가 자신의 권선을 통하여 흐른다. 이러한 구조의 정합회로를 인덕턴스결합을 가진 정합(L-matching)이라 한다[7]. 본 논문의 정합회로는 L-matching을 수정해서 개발되었다. 이때 인덕턴스로는 권선형변압기가 사용되었고 두개의 커패시터는 정합소자로서 포함되었다(그림 6).

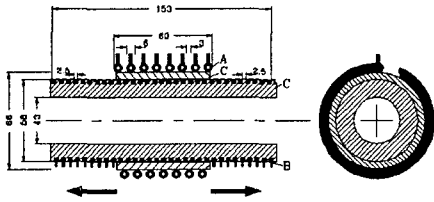


그림 5. 대칭형변압기  
Fig. 5. Symmetrizing transformer

변압기의 구조는 그림 5에 나타나 있다. 이 대칭형 변압기는 두 개의 실린더형 공심코일이 테플론원통(C) 위에 감겨서 하나의 동축구조를 이루고 있다. 2차코일은 1차코일의 내부에 들어있고 밖으로 돌출되어 있다. 1차코일은 직경 6[mm]의 동관으로, 2차코일은 직경 2, 5[mm]의 동선으로 이루어져 있다. 코일의 매 1회 권선위에 수직으로 구리핀을 연결하였다. 코일권선의 연결위치를 적절히 선택하여 레이저관의 임피던스가 정합을 이루도록 할 수 있다. 온도가 높아지면 플라즈마 임피던스는 변화하고, 금속중기레이저에서처럼 다른 금속성분(카드뮴[5], 셀레늄[8-9] 등)이 혼합되어도 조금씩 변하기 때문에 두 개의 공기가변콘덴서로 미세조정이 이루어진다.

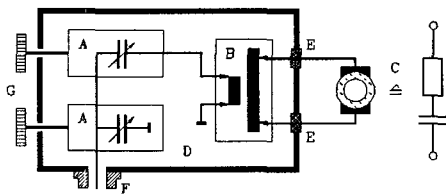


그림 6. 정합회로의 구조  
Fig. 6. Structure of matching circuit

1차측과 2차측코일 사이의 기생커패시터스에 의한 작은 비대칭성은 권선수를 유지하면서 2차측 코일연결의 위치를 조금씩 바꾸어 줌으로써 조정 가능

하다. 테플론은 합성수지중 가장 작은 값의 손실각( $\tan\delta=0.1-1.3 \cdot 10^{-3}$ )과 극히 작은 유전율( $\epsilon_r=2.1$ )을 가지므로 코일지지대의 재질로 사용되었다. 내열성이 높아서 코일의 손실에 의한 가열에도 그다지 민감하지 않다.

그림 6에서처럼, 정합회로는 외부로부터의 방해전자파를 차단하기 위하여 알루미늄 주물용기(D) 속에 설치되었다. 두개의 공기가변콘덴서(A)는 용기 밖의 회전단추(G)로 조절이 가능하다. 대칭형변압기(B)는 2차측으로부터 주물용기의 테플론통로를 거쳐 방전관(C)과 연결되어 있다. rf-전력은 동축의 N-접속소켓(F)을 거쳐 rf-발생기에서 공급된다. 이 구조로 만들어진 회로를 사용하여 거의 반사파가 없는 임피던스정합 뿐만 아니라 훌륭한 대칭성을 실현할 수 있었다. 저항과 커패시터로 이루어진 방전관등가회로의 자체임피던스는  $Z_R = R_R + jX_R$  이다.

#### 4. 등가회로

##### 4.1 정합회로에 대한 등가회로

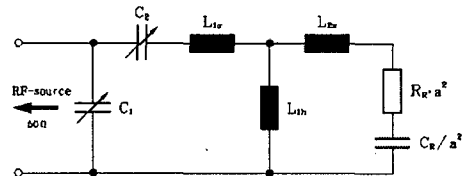


그림 7. 정합회로에 대한 등가회로  
Fig. 7. Equivalent circuit of matching circuit

정합회로 전체 구조에 대한 등가회로를 그림 7에 나타내었다. 대칭형변압기에 상응하는 등가 T회로는 1차측 누설인덕턴스  $L_{1a}$ , 주인덕턴스  $L_{1b}$ , 그리고 2차측 인덕턴스  $L_{2X}$ 로 이루어져 있다. 방전관의 임피던스  $Z_R$ 의 소자들은 변환비  $a$ 의 자승을 곱하고 나누어서 표시하였다. 여기에서  $C_2$ 는 L-matching에서와 같이  $L_{1a}$ 에 의한 리액턴스를 조정하는데 기여한다. 변압기를 사용한 정합회로의 또 다른 장점은 방전관 리액턴스의 보상에 필요한 인덕턴스가 축소됨으로써 더욱 소형의 구조를 가진 정합회로가 가능하다는 것이다.

표 1에는 방전관임피던스의 실수저항값  $R_R$ , 리액턴스  $X_R$ 을 나타내는 방전관커패시턴스  $C_R$ , 1차측 및 2

표 1. 등가회로 소자들의 계산치

Table 1. Values of the elements of equivalent circuit for matching

R <sub>R</sub> [Ω]	C <sub>R</sub> [pF]	X <sub>R</sub> [Ω]	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	a	L <sub>2x</sub> [μH]	L <sub>1h</sub> [μH]	L <sub>1σ</sub> [μH]	C <sub>1</sub> [pF]	C <sub>2</sub> [pF]
36.7	53.9	-217.8	7	16	0.516	0.37	1.60	1.14	358.3	276.3
44.3	50.7	-231.5	7	16	0.516	0.37	1.60	1.14	295.9	326.0
26.2	48.5	-242.0	7	16	0.516	0.37	1.60	1.14	414.4	357.7
29.4	22.0	-533.5	7	23	0.497	1.23	1.60	1.14	434.0	273.0
19.5	23.6	-497.3	7	23	0.497	1.23	1.60	1.14	611.2	196.9

차측 권선수 N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, 변환비 a, L<sub>2x</sub>, L<sub>1h</sub>, L<sub>1σ</sub>, C<sub>2</sub> 그리고 C<sub>1</sub>이 나타나 있다. 임피던스정합은 주어진 소자들의 최대값과 최소값의 범위안에서 가능했다. 1차 코일의 최대 권선수 N<sub>1</sub>=7, 2차측 최대 권선수 N<sub>2</sub>=30이다. 대칭형변압기의 치수값으로부터 인덕턴스와 변환비의 계산은 다음절에서 상세히 설명하였다. 두 개의 커패시터는 45~650[pF] 사이에서 조정 가능하다.

계산상으로는 몇몇 무시되는 값들이 있을지라도 여기에서 개발된 등가회로는 정합회로를 충분히 정확하게 설명하고 있다.

표 1의 값들은 방전관임피던스의 변화에 따른 정합회로내의 소자들의 값을 표시하고 있다. 여기에서 실현된 정합회로를 사용하여 임피던스의 실수값들은 약 15~110[Ω] 커패시터들은 약 12~300[pF]의 영역에서 정합이 이루어졌다.

#### 4.2 등가 T회로의 계산

그림 6의 대칭형변압기는 그림 7의 등가 T회로로 표현된다. 1차측 및 2차측 권선들은 유도결합된 코일들로 간주된다. 각 코일에 생기는 자속 Φ<sub>11</sub>, Φ<sub>22</sub>은 아래의 식으로 주어진다.

$$\Phi_{11} = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{21}, \quad \Phi_{22} = \Phi_{2\sigma} + \Phi_{12} \quad (1)$$

Φ<sub>1σ</sub>와 Φ<sub>2σ</sub>는 각 코일의 누설자속이며 Φ<sub>21</sub>과 Φ<sub>12</sub>는 양쪽 코일을 관통하는 상호자속이다. 1, 2차측 코일의 인덕턴스 L<sub>1</sub>과 L<sub>2</sub>는 다음의 식으로 계산된다[10].

$$L_{1,2} [nH] = \frac{2.2N_{1,2}^2 D_{1,2}}{1 + 2.2(l_{1,2}/D_{1,2})} \quad (2)$$

N<sub>1</sub>과 N<sub>2</sub>는 코일의 권선에 부착된 연결구리핀 사

이의 총 권선수, l<sub>1</sub> 과 l<sub>2</sub> 는 코일의 길이이며 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>는 코일의 직경[mm]이다. 등가회로의 계산을 위해서는 다음의 조건들을 가정한다.

1. 코일의 저항성분은 무시된다. 이것은 사용된 관의 직경 혹은 전선의 직경 그리고 표피효과와 고려에서도 정당함이 입증된다.
2. 코일자체와 코일권선 사이에 기생하는 커패시터는 무시된다. 이것은 가변커패시터의 미미한 변화로서 정합회로에 포함된다.
3. 2차코일로 부터 생성되는 상호자속 Φ<sub>12</sub>는 1차측 코일을 완전히 관통한다. 이것은 누설자속은 0이 됨을 뜻한다. 즉,

$$\Phi_{2\sigma} = 0 \quad (3)$$

4. 1차측 코일로 부터 생성되는 상호자속 Φ<sub>21</sub>는 2차측 코일의 권선중에서 단지 1차측코일에 둘러 쌓인 권선 N<sub>2</sub>'만을 관통한다. 이 가정은 코일 외부의 자기장은 0이 된다는 접근에서 시작된다. (2)에서 코일의 인덕턴스는 다음과 같이 분해된다.

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{1h}, \quad L_2 = L_{2\sigma} + L_{2h} \quad (4)$$

여기서 L<sub>1σ</sub>와 L<sub>2σ</sub>는 각 코일의 누설인덕턴스이며 L<sub>1h</sub>와 L<sub>2h</sub>는 주인덕턴스이다. 1차측 누설인덕턴스는 1차측 코일의 전체면적에 대한 두 코일사이의 단면적의 관계에 따라서 계산된다.

$$L_{1\sigma} = L_1 \left( \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2} \right) = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma}}{i_1} \quad (5)$$

가정 3의 (3)에 의해서 2차측 누설인덕턴스는 다음과 같이 주어진다.

$$L_{2\sigma} = \frac{N_2 \Phi_{2\sigma}}{i_2} = 0 \quad (6)$$

$i_1$  과  $i_2$  는 1, 2차측 코일에 흐르는 전류이다. 주인덕턴스의 계산에는 다음의 식이 적용된다.

$$L_{1h} = \frac{N_1 \Phi_{21}}{i_1}, \quad L_{2h} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{i_2} \quad (7)$$

그리고 (6)에 의해서 (4)의  $L_{2h}$ 는 다음과 같다.

$$L_{2h} = L_2 \quad (8)$$

자속쇄교수는 아래의 식으로 표현된다.

$$\lambda_{12} = N_1 \Phi_{12} = M i_2, \quad \lambda_{21} = N_2 \Phi_{21} = M i_1 \quad (9)$$

가정4에 의하면 2차측 코일 중에서 1차측 코일의 내부에 들어있는 권선만을 1차코일에 의한 상호자속  $\Phi_{21}$ 이 관통하므로 (9)에는  $N_2'$ 가 나타난다.  $M$ 은 상호인덕턴스이다. (9)의 두 식을 곱하여

$$M^2 i_1 i_2 = N_1 N_2' \Phi_{12} \Phi_{21} \quad (10)$$

로 나타내고 또한, (7)의 두 식을 곱하면 다음의 관계가 성립한다.

$$L_{1h} L_{2h} i_1 i_2 \frac{N_2'}{N_2} = N_1 N_2' \Phi_{12} \Phi_{21} \quad (11)$$

(10)과 (11)의 좌변이 같으므로 상호인덕턴스는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M = \sqrt{L_{1h} L_{2h} \frac{N_2'}{N_2}} \quad (12)$$

등가 T회로의 계산을 위한 회로도가 그림 8에 나타나 있다. 여기에서 2차측에는 아래의 관계가 고려된다( $a$ 는 임의의 상수).

$$V_2' = V_2 a, \quad I_2' = \frac{I_2}{a} \quad (13)$$

$V_1, V_2$ 는 1, 2차측 코일에서의 전압이다. 가정 1과 가정 2를 고려하여 다음의 변압기방정식을 얻는다.

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad (14)$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \quad (15)$$

위의 두 식에 (13)을 대입하고 (15)에는  $a$ 를 곱하여 정리한다.

$$V_1 = j\omega(L_1 - aM)I_1 + j\omega aM(I_2' + I_1) \quad (16)$$

$$V_2' = j\omega(a^2 L_2 - aM)I_2' + j\omega aM(I_2' + I_1) \quad (17)$$

그림 8의 등가 T회로의 소자들은 상수  $a$ 의 값에 좌우된다. 임피던스  $Z_3$ 은 다음과 같다.

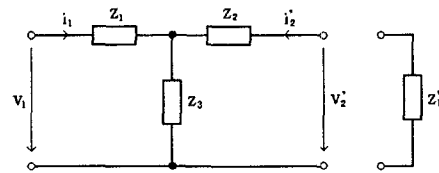


그림 8. 대칭형변압기의 등가 T회로 및 방전관 임피던스  
Fig. 8. Equivalent T-circuit of symmetrizing transformer and discharge tube impedance

$$Z_3 = j\omega aM = j\omega L_{1h} \quad (18)$$

이 식과 (12)를 결합하여 다음의 관계를 얻는다.

$$a = \sqrt{\frac{L_{1h}}{L_{2h}} \cdot \frac{N_2'}{N_2}} \quad (19)$$

$a$ 는 변환비로 정의된다. 이때 자속  $\Phi_{21}$ 은 2차측 코일을 완전히 관통하지 않는다는 것을 고려한다. (8), (12) 그리고 (19)를 사용하여 다음과 같이 정리한다.

$$Z_1 = j\omega(L_1 - aM) = j\omega(L_1 - L_{1h}) = \omega L_{1\sigma} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= j\omega(a^2 L_2 - aM) = j\omega a^2(L_2 - \frac{M}{a}) \\ &= j\omega a^2 L_2 (1 - \frac{N_2'}{N_2}) = j\omega L_{2\sigma} \end{aligned} \quad (21)$$

2차측코일에는 1차측코일에 의한 상호자속  $\Phi_{21}$ 이 관통하지 않는 부분이 있는데 이들은  $L_{2\sigma}$ 에 2차측의 영향을 끼치지 않는다. 반면에 이 부분이 생성하는 자속은 2차측의 상호자속  $\Phi_{12}$ 의 일부로서 1차측 코일을 거의 대부분 관통한다. (2), (5), (4), (21) 그리고 (19)를 이용하여 그림 7의 소자들  $L_{1\sigma}, L_{1h}, L_{2\sigma}$ 와 변환비  $a$ 를 계산하여 표 1에 수록하였다. 1차측 권선수  $N_1=7$ 일 때  $N_2'=13$ 을 적용하였다. (13)에 의해서 등가회로

내의 방전관 임피던스는 아래의 식이 적용된다.

$$Z'_R = \frac{V_2'}{I_2} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_R$$

$$= a^2 R_R + \frac{1}{j\omega(C_R / a^2)} \quad (22)$$

### 5. 결 론

본 논문에서는 용량결합고주파(ccrf)방전을 기체 레이저의 여기에 적용하기 위한 목표를 가지고 방전 시스템을 설계, 제작하여 신뢰성 있는 운전을 실현하였다. 운전주파수 13.56[MHz]의 rf-전력을 효율적으로 결합하기 위해 선택된 방전관과 특수 제작된 rf-전극을 사용하였다. 또한 균질한 ccrf-방전의 형성을 위하여 임피던스정합회로를 개발하였다.

길이 400[mm], 폭 4[mm]인 두 개의 구리전극을 방전관 양쪽에 길이로 부착하였다. 섬락이 억제되고 열방사가 용이한 특수한 구조를 가진 rf-전극을 제작하였다. 1[kPa]에서 10[kPa]사이의 다양한 헬륨압력과 10[W]에서 200[W]까지 변화하는 rf-전력을 변수로 한 실험에서 직경 5[mm], 길이 0.4[m]인 석영 유리로 만든 방전관이 선택되었다.

임피던스정합회로는 관임피던스를 rf-전원의 50 [Ω] 출력저항에 맞추는 목적을 가지고 있다. 비대칭적인 rf-전력의 공급으로 생기는 방전의 불균질성과 전극구간을 벗어나는 방전형성 및 접지전류에 의해 주변 전자기기들에 장애를 일으키는 문제를 해결하기 위한 정합회로를 개발하였다.

제작된 정합회로에는 2개의 공심코일로 이루어진 대칭형변압기를 사용하여 rf-전력 공급의 대칭화를 실현하였다. 전체적인 ccrf-방전시스템의 구조는 13.56[MHz]의 rf-발생기, 전력측정기, 정합회로 그리고 rf-전극이 부착된 방전관으로 이루어져 있다.

본 시스템은 균질한 플라즈마를 발생시킴으로써 연속파기체레이저의 rf-여기를 위한 방전기술을 현실화하였다. 또한 홀로우음극방전을 사용한 레이저에서 발전하는 모든 레이저선들도 본 시스템을 사용하여 발전이 가능하며 향후 자외선연속파레이저의 개발에 접목시킬 수 있을 것이다.

본 연구는 경주대학교 2005년도 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] W. J. Witteman, V. N. Odhkin, "Gas lasers - recent developments and future prospects", Kluwer Academic Pub., Printed in Netherlands, pp. 55-67, 1996.
- [2] M. F. Sérn, V. Ya. Khasilev, V. S. Mikhalevskii, G. N. Tolmachev, "Metal vapour ion lasers with excitation by transverse radiofrequency discharge", Proc. Int. Conf. Lasers, New Orleans, pp. 182, 1980.
- [3] Yuri P. Raiser, "Modern considerations on two forms of radio-frequency capacitive discharge at intermediate pressure and comparison with low pressure rf-discharge", XXI. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Cases, Vol.III: Invited and additional papers, Ruhr-Uni. Bochum, pp. 245, 1993.
- [4] A. N. Korolkov, V. A. Stepanov, "Spectroscopic and probe investigations of a high-frequency transverse discharge in helium", Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii, 38, No.5, pp. 720, 1983.
- [5] N. Reich, J. Mentel, J. Mizeraczyk, "cw radio-frequency excited white-light He-Cd+ laser", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, No. 11, pp. 1902-1909, 1995.
- [6] V. S. Mikhalevskii, G. N. Tolmachev, V. Ya. Khasilev, "Optimization of the excitation conditions of a transverse rf discharge He-Cd laser", Sov. J. Quantum Electron., 10, No. 7, pp. 884, 1980.
- [7] C. L. Hall, "The ARRL antenna book", The American Radio League, Inc., Newington, USA. pp. 4.1-4.11, 1984.
- [8] S. T. Choi, "A study on optical gain and output-coupling power of selenium vapour laser using isotope helium", J. OSK, Vol. 11, No. 2, 114-118, 2000.
- [9] S. T. Choi, "A study on output power characteristic of selenium vapour multiline laser using isotope helium and helium filter", J. KIEE, Vol. 18, No. 2, 16-22, 2004.
- [10] Meinke, Gundlach, "Taschenbuch der Hochfrequenz-technik", Band 2: Grundlagen, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. E14, 1986.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 최상태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1992년 독일 보훔 루르대학교 전기공학부 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 조교수.