

대출력 엑사이머 레이저의 개발

최 부 언, 정 재 근, 이 주 희
경희대학교 공과대학 전자공학과

요 약

방전여기 엑사이머 레이저의 방전특성을 해석하기 위하여 레이저 발진 장치를 개발, 실험을 하였다. 실험결과 가스혼합비 $Kr/F_2/He = 4/0.2/95.8\%$, 증기압 2 기압, 가압전압 30 kV 에서 최대출력 80 mJ, 가압전압 20 kV 에서 최대효율 0.5 % 를 얻었다. 또한 대출력, 고효율화를 위하여 실험조건과 동일하게 방전특성을 해석한 결과 레이저 방전관의 저항값과 인덕턴스가 적을수록 레이저 방전관에 입력되는 에너지가 커지므로 이들의 값을 적게하여야만 대출력 고효율화를 꾀할수 있음을 알수 있었다.

I. 서 론

방전여기 엑사이머 레이저는 전자빔 여기 방식과는 달리 고반복의 발진이 가능하고 또한 장치가 간단하여 실용성이 높아 실용적 연구분야에서 응용되고 있다. 그러나 방전여기 방식은 전자빔여기 방식에 비해 효율이 낮으며 그 시뮬레이션의 신뢰성도 뒤떨어져있다. UV 에 비전리 방식의 시뮬레이션은 Green 과 Brau에 의해 처음으로 보고되었으며[1], 여러가지 실험 결과와의 비교가 행하여지고 있으나 방전회로를 포함한 방전과정의 기술이 복잡하고 또한 많은 가정을 포함하기 때문에 그 계산의 정확도가 충분하게 보증되는 것은 아니다.

그러므로 본 연구에서는 방전여기 엑사이머 레이저 발진 장치를 개발하고 매질가스로서 $Kr / F_2 / He$ 혼합가스를 사용하여 그 출력특성을 고찰하고 출력 파라메타를 최적화하였으며, 방전관 내의 비선형 방전저항을 플라즈마 카이네틱스 방정식과 볼츠만 방정식을 이용하여 구하였다. 이때 방전관 내의 과도 현상은 E M T P(Electro-Magnetic Transients Program)[2] 를 이용하여 해석하고 방전 전압, 전류의 특

성을 고찰하여 대출력화 및 고효율화의 지침을 얻고자 하였다.

II. 용량이행형 방전여기 KrF 레이저의 출력특성

II-1. 실험장치

본 실험에서 사용한 용량이행형 방전여기 장치의 단면도와 그 등가회로를 각각 그림 1과 2에 나타내었다. 주 에너지 저장 캐패시터인 C_1 은 각각 2.7 nF (정격전압 40 kV)의 캐패시턴스를 가지는 42개의 BaTiO₃ 캐패시터로 구성되며 총 캐패시턴스는 113.4 nF이다. 2차 에너지 저장 캐패시터인 C_2 는 각각 2.7 nF (정격전압 40 kV)의 캐패시턴스를 가지는 21개의 BaTiO₃ 캐패시터를 2 줄로 구성하여 총 캐패시턴스를 113.4 nF로 하여 C_1/C_2 를 1.0로 하였다. 방전 공진기는 총 채적 7.0 l로서 방전상태를 관측하기 위해 아크릴로 제작하였다. 전극은 길이 60 cm, 폭 1 cm로 황동을 사용하였으며, 예비전리용 핀은 균일한 예비전리와 충분한 예비전리 전자밀도를 얻기 위해 아노드 판에 연결된 캐패시터 C_2 으로 부터의 직경 2 mm의 스텐레스 봉과

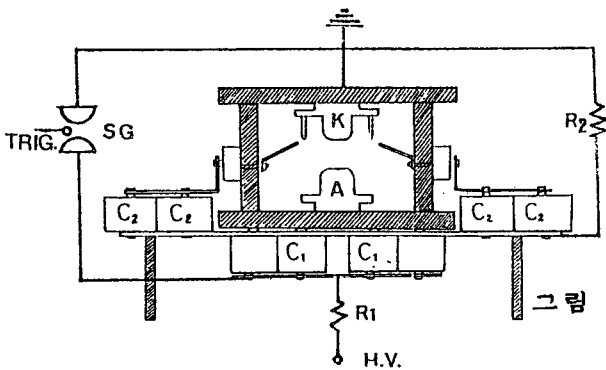


그림 1. 용량이행형 방전여기 KrF 레이저 장치의 단면도

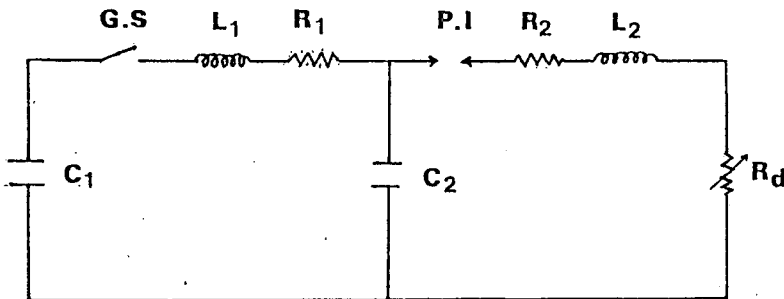


그림 2. 장치의 등가회로

캐소드 전극의 양쪽에 직접 연결된 직경 2 mm의 황등봉을 2 mm간격으로 두었으며 전극 양쪽에 각각 31개를 20 mm 간격을 두고 2 줄로 설치하였다.

II-2. 출력특성

KrF 레이저 출력에 가장 큰 영향을 주는 것은 F_2 의 농도이므로 Kr농도를 4%에 고정시키고 F_2 의 농도를 0.1%에서부터 0.6%까지

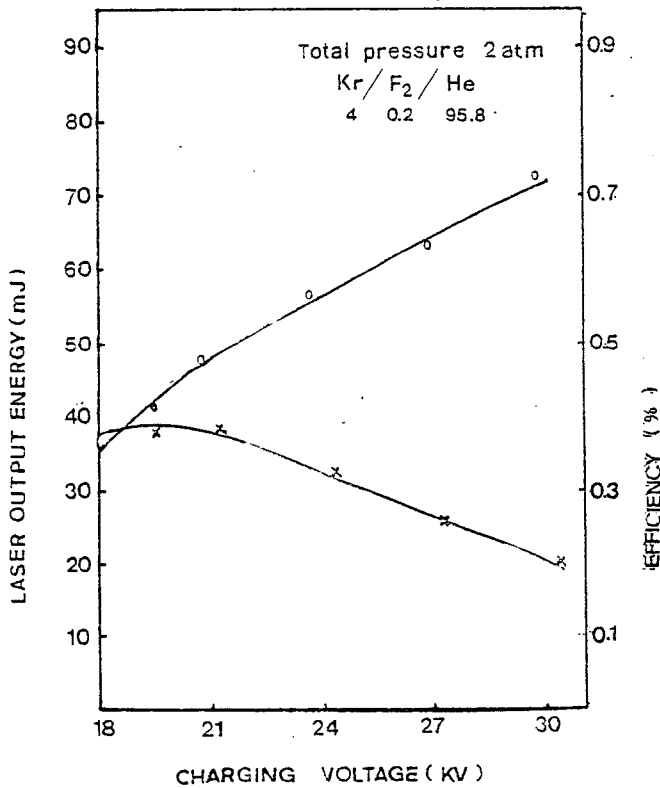


그림 3. 인가전압에 대한 출력과 효율

가압 전압이 30 kV 일때 최대 출력 80 mJ, 20 kV 일 때 최고효율 0.5%를 얻었다[3].

III. 비선형 방전저항의 계산

본 실험에서 사용한 용량이행형 방전여기 장치의 등가회로는 그림 2와 같으며 이 등가회로에서 비선형 방전저항 R_d 는 레이저 방전관

변화시킨 결과 0.2%에서 최고의 출력을 나타내었다. 또한 Kr농도의 의존성에 관한 실험에서는 4%의 Kr농도에서 최대출력을 기록하였다.

그리고 증기압에 대한 레이저 출력의 의존성에 관한 실험에서는 가스 혼합비를 $Kr/F_2/He=4/0.2/95.8\%$ 로 하였을때 증기압 2 기압에서 최대출력을 나타내었다. 그림 3은 가스 혼합비 $Kr/F_2/He=4/0.2/95.8\%$ 증기압 2 기압일 때 캐패시터뱅크 C1의 가압 전압에 대한 출력 의존성과 효율에 대한 그래프이다.

의 내부 저항으로, 플라즈마 다이내믹스에 의해서 계산되는 것으로 다음과 같은 수식으로 표현된다[4].

$$R_d = d / (e A \mu_e n_e) \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기에서 d 는 전극의 간격, e 는 전자의 전하, A 는 방전 유효단면적, μ_e 는 전자의 이동도, n_e 는 전자의 수밀도를 나타낸다.

방전저항이 비선형성을 나타내는 것은 전자의 이동도 μ_e 와 전자의 수밀도 n_e 가 시간에 따라서 변하기 때문이다. 그러므로 전자의 이동도 μ_e 와 수밀도 n_e 를 구하므로서 비선형 방전저항을 구할 수 있는데 이들은 각각 볼츠만 방정식(Boltzmann equation) [5] 과 카이네틱스 방정식(Kinetics equation) [6] 으로 부터 구하였다.

III-1. 볼츠만(Boltzmann) 방정식

전자와 각 입자와의 충돌과정 반응정수는 전자가 지니는 에너지에 의존하므로 방전형의 경우 플라즈마내의 전자 에너지의 분포를 알아야 하므로 볼츠만 방정식을 사용하여 전자의 에너지 분포함수를 계산하였다. 정상상태의 볼츠만 방정식은 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현되며 이식에 의하여 전자의 분포함수가 결정된다[4].

$$\begin{aligned} & (1/3)(E/N)^2 (d/du)(u/Q_1)(df/du) + (2m/M)(d/du)(u^2 Q_2 f) \\ & + (2mkT/Me)(d/du)(u^2 Q_2)(df/du) + \sum_j (u + u_j) f(u + u_j) Q_j(u + u_j) \\ & - uf(u) \sum_j Q_j(u) + \sum_j (u - u_j) f(u - u_j) Q_j(u - u_j) \\ & - uf \sum_j Q_{-j}(u) = 0 \quad \text{-----} \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서 $M = \sum_n M^n G^n$, $Q_1(u) = \sum_n Q_1^n(u) G^n$,

$Q_2(u) = \sum_n (M Q_2^n(u) G^n / M^n)$, u : 전자 에너지, E : 전계강도,

N : 전 가스 입자밀도의 총합, T : 가스온도, k : 볼츠만 상수,

e, m : 전자의 전하 및 질량, M : 평균 분자질량,

M^n, G^n : 성분 n 의 분자질량과 몰분율, $Q_m^n(u)$: 성분 n 의
 운동량 전달단면적, $Q_j(u)$: j 번째 비탄성 충돌단면적,
 $Q_j^c(u)$: j 번째 초탄성 충돌단면적을 나타낸다.

이 방정식은 정상방전의 경우 성립하는 것이지만 입자의 평균충돌
 시간이 수 pico초 정도이고, 또한 1 nsec이하에서 평균화된다고 생각
 되므로 볼츠만 방정식은 각각의 E/N 에 따라 준정상상태의 분포함수
 $f(u)$ 를 계산한다. 계산에 사용한 Kr과 He의 운동량 전달 단면적, 어
 기 및 이온화 단면적은 D.Rapp등[7] 과 M.R.Flannery등[8] 의 데이타
 를 참고하였다. F_2 의 전자와의 충돌은 F_2 의 양이 1%미만이기 때문에
 볼츠만 코드에서는 포함하지 않았다. 초탄성충돌 단면적은 비탄성충돌
 단면적과 관련되어 있지만 분포함수에서 무시할수 있을 정도[4] 이므
 로 고려하지 않았다. 또한 전자-전자의 충돌도 무시하였다. 그림 4는

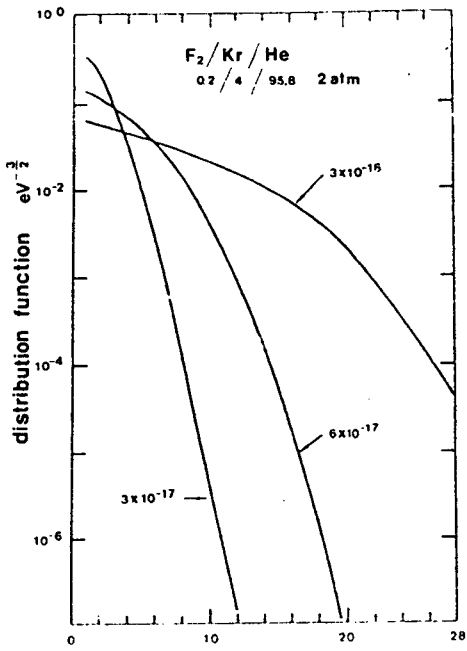


그림 4. 전자 에너지 분포함수

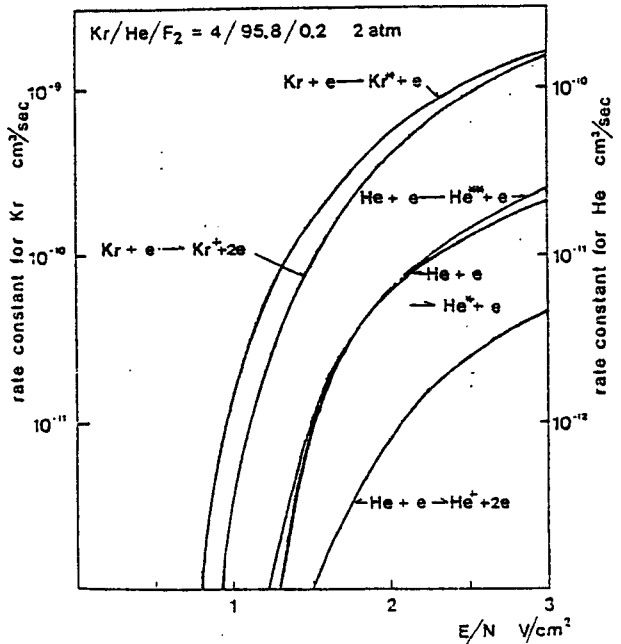


그림 5. E/N 에 대한 각 반응정수

볼츠만 코드로 구한 전자의 에너지에 따른 전자의 에너지 분포함수
 $f(u)$ 를 나타낸 것이다. Kr 4%, He 95.8% 송기압 2 기압의 가스혼합물에

서 E/N 이 $3 \times 10^{-17} \text{ V cm}$, $6 \times 10^{-17} \text{ V cm}$, $3 \times 10^{-16} \text{ V cm}$ 의 경우를 표시한 것으로 E/N 이 증가함에 따라 높은 에너지를 가진 전자의 수가 급격하게 증가함을 나타낸다[9]. 그림 5는 E/N 에 대한 Kr와 He의 전자와의 충돌에 대한 반응정수를 나타낸 것으로 전자충돌에 의한 Kr^* 와 Kr^+ 의 생성정수는 E/N 이 작은 곳에서는 전자가 크지만 E/N 이 $3.0 \times 10^{-16} \text{ V cm}$ 이상에서는 역전함을 알 수 있다. 이에 대해 He^* 와 He^+ 의 생성정수는 E/N 이 작은 곳에서는 극히 작다. 이것은 He의 여기상태가 19.8 eV 또는 높은 레벨에 있기 때문이다.

III-2. 카이네틱스 방정식

본 카이네틱스 방정식에서 고려한 주요 반응기구는 표 1과 같다.

표 1에서 전자의 충돌에 기여하는 반응정수는 E/N 의 변화에 따라 불르만 코드에 계산하였다. 카이네틱스 방정식은 미지수로서 e , Kr^* , Kr^+ , Kr_2^* , Kr_2^+ , He^* , He^+ , He_2^* , He_2^{**} , He_2^+ , KrF^* , Kr_2F^* , F_2 , F 및 광자밀도 N_{ph} 를 취하여 15원의 연립 동차미분 방정식으로 구성하였다. UV 에비전리의 효과는 단순히 전자의 정상적인 발생으로 하여 카이네틱스 방정식에 받아 들었다. 전자수밀도 n 를 구하는 식은 다음과 같다[6]. 즉,

$$dn_e/dt = S + (v_i - \beta) n_e \quad \text{----- (3)}$$

여기에서 S 는 UV 에비전리에 의한 전자- 이온쌍의 생성률, v_i 는 2 차 전자에 의한 이온화율, β 는 F_2 등에 의한 부착율을 나타낸다.

그림 6은 카이네틱스 방정식으로 구한 전자수밀도와 비선형 방전저항을 시간에 대하여 나타낸 것으로 방전저항 R_d 는 무한대의 값에서 전자수밀도가 형성되어 그 최고치를 나타내는 순간 0.17Ω 정도로 떨어짐을 알 수 있었다.

IV. EMTP를 이용한 방전 전압 및 전류의 계산

방전관 내의 비선형 저항 R_d 가 구해지면 방전 전압 및 전류는 회로방정식에 의해서 구한다. 그러나 본 논문에서는 따로 회로방정식을 세우지 않고 최근 선진국에서 과도현상의 고찰에 많이 사용하는

EMTP (Electro-Magnetic Transients Program)를 이용하여 방전전압 및 전류의 과도현상의 특성을 고찰하였다.

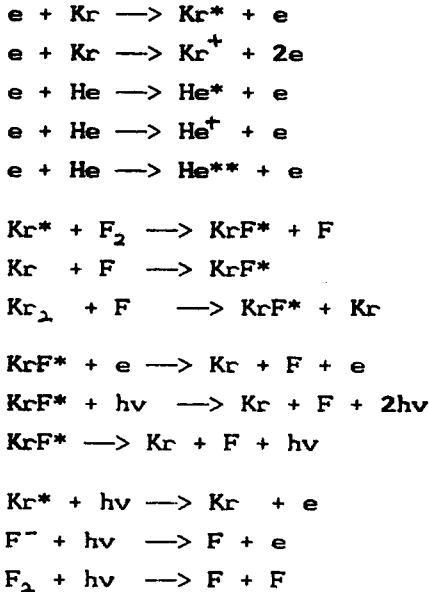


표 1. KrF Kinetic Reactions

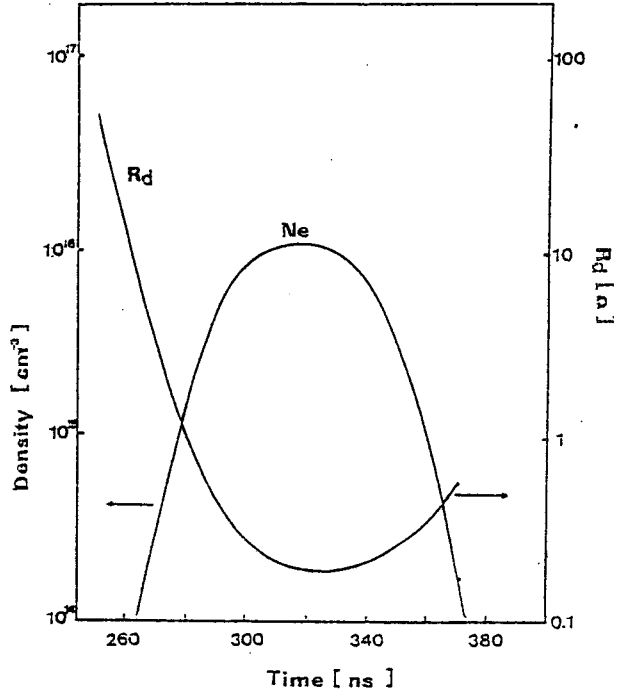


그림 6. 시간에 대한 Rd와 Ne

그림 2의 등가회로에서 L_1 과 R_1 은 C_1 의 전하가 C_2 로 이행할시 그 회로의 인덕턴스 및 저항이며, L_2 는 방전관부분의 인덕턴스이다. 또한 R_2 는 방전관 이외의 회로의 저항을 나타내며 L_1 은 1회 회전한 슬레노이드로 가정하면 150 nH이다. 그러나 R_1 및 R_2 는 계산상으로 구할 수는 없지만 그값은 일반적으로 0.1 ~ 0.5Ω의 값을 지닌다. 그러므로 본 계산에서는 L_1 을 150 nH로 고정하고 L_2 를 10 ~ 30 nH, R_1 과 R_2 를 각각 0.1 ~ 0.5Ω으로 변화시키면서 방전관 내의 방전 전압을 계산하여 실험에서 측정된 방전 전압과 비교한후 전압의 파형이 가장 일치할 때의 각 회로정수를 이용하여 방전 전류를 구하였다.

그림 7은 실험에서 측정된 방전 전압과 계산에 의해 구한 방전전압 및 전류를 나타낸 것으로 각 회로정수는 $L_2 = 15$ nH, $R_1 = 0.1$ Ω, $R_2 = 0.4$ Ω이었다. 방전 전압의 최고치는 29 kV, 상승시간은 170 ns, FWHM은 160 ns이었으며, 방전 전류의 최고치는 32.60 kA, 상승시간은

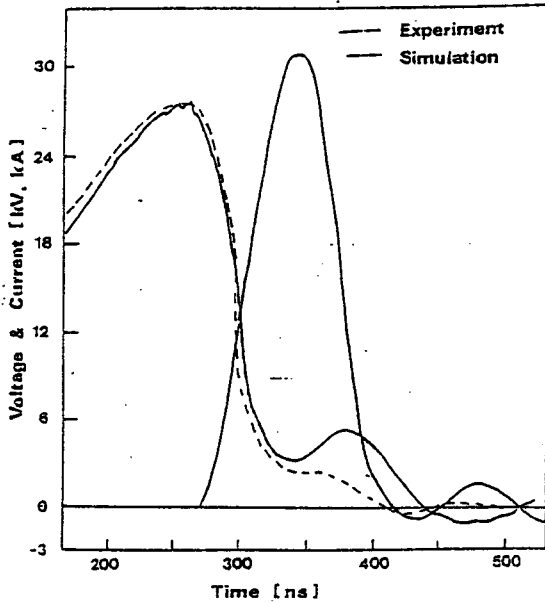


그림 7. 방전 전압 및 전류 파형

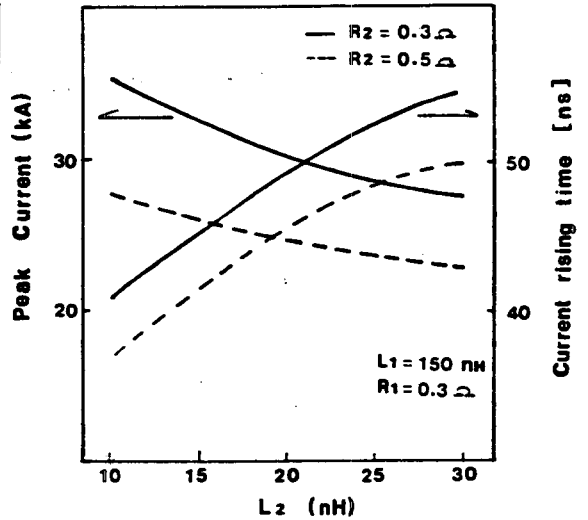


그림 8. L_2 에 대한 전류의
최고치와 상승시간

43 ns, FWHM 은 69 ns 이었다. 그림 8은 L_1 과 R_1 을 각각 150 nH, 0.3 옴으로 고정하고, R_2 가 0.1, 0.3옴일 때의 L_2 에 대한 전류의 최고치, 상승시간을 나타낸 것이다. 방전 전류의 최고치와 상승시간은 L_2 가 작을수록 높고, 빨라진다는 것을 알수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 용량이행형 방전여기 KrF 레이저를 제작하고, 또한 방전 플라즈마에 의하여 결정되는 비선형 저항을 구하여 EMP를 이용한 장치의 회로해석을 행하고 효율적인 장치의 설계방안을 제시하였다. 레이저 발진 실험결과 레이저 발진의 최적조건 중 최대출력은 가스 증기압 2 기압, 가스 혼합비 $Kr/F_2/He=4/0.2/95.8\%$, 가압 전압 30 kV 에서 80 mJ 이며, 최고효율은 가압 전압 20 kV 에서 0.5 % 이다.

이 효율은 방전여기 방식에서 pre-pulse 를 이용한 경우의 최고 효율 4.4 % [6] 과 용량이행형 방전여기 방식의 최고 효율 2.9 % [10] 와 비교해 볼 때 극히 낮은 효율임을 알 수 있다. 그 이유는 시

합계작한 장치의 등가 회로에서의 인덕턴스 L_2 가 15nH로서 이 L_2 로 인하여 방전 전류의 상승시간이 느려지기 때문으로 분석할 수 있다.

방전관 내의 비선형저항 R_d 는 $R_d = d / (e A \mu_e n_e)$ 의 식으로서 계산되는데 이식에서 시간에 따라 변하는 함수인 전자수밀도 $n_e(t)$ 와 전자의 이동도 $\mu_e(t)$ 에 의해 비선형적인 특징을 가지게 된다. 즉 이 비선형 저항 R_d 는 무한대의 저항값에서 $\sim 0.17\Omega$ 의 저항값으로 변화함을 알 수 있었다. 등가회로의 각 회로정수는 측정된 방전 전압과 비교하여 $L_1 = 150$ nH, $L_2 = 15$ nH, $R_1 = 0.1\Omega$, $R_2 = 0.4\Omega$ 으로 결정하였으며, 이 회로정수와 플라즈마 저항 R_d 를 이용하여 방전 전압 및 전류를 구하였다. 그 결과 방전 전압과 전류의 최고치는 각각 29 kV, 32.6 kA를 얻었으며 상승시간은 170 ns, 43 ns, FWHM 은 160 ns 69 ns 를 얻었다. 이는 KrF*의 상위준위에서의 수명이 ~ 6.7 ns임을 고려할 때 전류상승시간이 빠르면 빠를수록 고효율에 유리하므로 L_2 를 가능한한 작게하여야 함을 알 수 있다. 또한 전류의 최고치에 있어서 가스매질에 입력되는 파우어를 생각할 때, L_2 가 작을수록 높은 전류값을 얻을수 있으므로 마찬가지로 L_2 를 가능한한 작게 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] A.E.Greene and C.A.Brau, IEEE J.Quantum Electron, QE-14(12), 951(1978)
- [2] H.W.Dommel, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-88(4),388 (1969)
- [3] 정 재근, 최 부연, 이 주의, 전기, 전자 학술대회 논문집 (I) (1987)
- [4] M.Maeda et al, Japan J. Appl. Phys.,21(8),1161(1982)
- [5] K.Smith, R.M.Thomson, " Computer Modeling of Gas Lasers " (Plenum Press, N.Y.(1978))
- [6] M.Rokni, et al, J. Appl. Phys., 31(2), 79 (1979)
- [7] D.Rapp and P.Englander- Golden J.Chem.Phys.,43, 1464(1965)
- [8] D.Ton-That and M.R.Flannery, Phys.Rev., A 15, 517(1977)
- [9] 정 재근, 석사학위 논문 (1988)
- [10] K.Miyazaki, et al, Rev. Sci. Instrum., 56, 201 (1985)