

## 효율적 균일 방전을 위한 레이저 전극 형상 비교

김동환 · 주 흥 · 최상삼

한국과학기술연구원, 응용물리 연구실

(1992년 2월 21일 받음)

엑시머 레이저나 TEA CO<sub>2</sub> 레이저로 응용되는 균일 방전을 위한 전극 형상 설계에 중요한  $k$  값과 전극의 크기에 고려되는 최소 허용 전기장의 위치와의 관계를 Chnag 형상과 Ernst 형상에 대해 각각 계산, 비교하였다. 이 결과는 전극 형상 설계에 있어서 초기  $k$  값 설정에 도움표를 제공한다. 전극 표면에서 각각의 전기장 세기를 비교하여 Ernst 형상이 Chang 형상보다 2배내지 3배 정도로 균일 전기장 분포가 넓게 설계될 수 있음을 보였다.

### I. 서 론

최근 들어 강력한 자외선 레이저의 산업적 응용에 있어서 엑시머 레이저의 중요성이 크게 대두되고 있다. 그런데 이러한 펄스형 기체 방전 레이저의 핵심 기술은 아크없는 균일 글로우 방전을 형성하는 것이다. 이를 위해서는 방전 가스의 순수도, 최적화된 방전 전기 회로의 구성, 균일 전기장 분포를 갖는 전극 형상 설계 등이 주요한 요인이 되고 있다. 이 중 본 논문은 최소 너비의 재료로 넓은 균일 전기장 분포를 이루도록 하는 전극 형상 설계 방법의 비교와 Ernst 형상 설계시 초기 변수 설정을 위한 도움표를 제시한다.

이미 균일 전기장 분포를 위한 전극 형상 설계에는 Rogowski 형상, 균일 전기장 분포를 위한 전극 형상 설계에는 Rogowski 형상, Bruce 형상 및 Harrison 형상이<sup>[2]</sup> 발표된 바 있으나 이들 형상 모두는 두 전극 사이의 전기장 분포를 해석적으로 표현할 수 없는 수치적이거나 실험적 형상이다.<sup>[1,2]</sup> 이에 반해 이미 펄스형 기체 레이저 전극에 널리 보편화된 Chang<sup>[1]</sup>이나 Ernst 형상은 전기장 및 전위 분포의 해석적인 표현이 가능하여 전극 형상의 기하학적인 크기에 따라 글로우 방전이 일어나는 방전폭의 크기나 방전 균일도 등을 물리적으로 예측할 수 있는 장점이 있다. 더우기 이 두 형상은 오늘날 널리 보편화되어 있는 컴퓨터 수치 제어기(computer-controlled numerical machine)로 프로그램화 하여 전극 형상 가공이 용이하다.

### II. 본 론

먼저 Chang 형상은<sup>[3]</sup> 다음과 같은 conformal 사상으로 부터 시작된다.

$$z = w + k \sinh[w] \quad (1)$$

여기서  $z = x + iy$ 이고,  $w = u + iv$ 이며  $x, y$ 는 실제 공간 좌표이고  $u$ 와  $v$ 는 물리적으로 각각 전기장 flux와 전기장 포텐셜을 뜻하며,  $k$ 는 전극의 기하학적인 폭에 관계되는 변수이고 여기서  $k > 0$ 이다. 다음의 설명에서 보게 되겠지만  $k$ 값이 작을수록 방전 폭이 넓어지므로 전극의 폭도 넓은 형상을 하게 된다. 따라서, 작은  $k$ 값은 레이저 빔의 dimension이 큰, high aperture 황여기 레이저 전극 설계시 유효하다.

식 (1)을 각각의 공간 좌표를  $u, v$ 의 함수로 표현하면

$$\begin{aligned} x &= u + k \cos[v] \sinh[u] \\ y &= v + k \sin[v] \cosh[u] \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 따라서 전극 크기와 허용 전기장 세기의 위치에 따라  $v, k$ 값이 각각 주어지면  $u$ 를 매개 변수로 전극 형상을 나타낼 수 있다. 식 (2)를 보면  $u \rightarrow (-u)$ 에 대해  $x \rightarrow (-x), y \rightarrow y$ 이므로  $y$ 축에 대해 대칭인 그래프이다. 또한  $v \rightarrow (-v)$ 에 대해  $x \rightarrow x, y \rightarrow (-y)$ 이므로 전기장 포텐셜  $v$ 에 대해  $x$ 축 대칭인 그래프이다. 먼저 최적의 전극 형상을 계산하기 위한  $v$ 값은 다음의 전기장 분포로부터 얻어진다.

$$E = |dw/dz| = [(1+k \cos[v] \cosh[u])^2 + (k \sin[v] \sinh[u])^2]^{-1/2} \quad (3)$$

전개하면 다음과 같다.

$$E = a_0(v) + a_2(v) u^2 + a_4(v) u^4 + \dots \quad (4)$$

따라서  $u^4$  이하 항을 무시하면  $E$ 가  $u=0$ 에서 최대가 되기 위한 조건은  $a_2(v)=0$ 이다. 이 조건은  $[\partial^2 E / \partial u^2]_{u=0} = 0$ 와 같으므로 식 (3)에서 Chang 형상의 전극 표면에서 전기장 포텐셜( $v_c$ )는 다음과 같은 관계식으로 나타내어진다.

$$d_m = [E(0) - E(x_m)] / E(0) \quad (5)$$

또한 전기장 크기  $E$ 는  $u$ 의 단조 감소 함수이므로 전극의 폭과 전극간 간격의 비율(aspect ration)과 관계있는  $k$  값은 실제 설계상 고려되는 전극 중심( $x=0$ )으로부터 전기장의 비균일 정도( $d_m$ )만큼 벗어나는 위치( $x_m$ )로부터 구하여진다.

$$d_m = [E(0) - E(x_m)] / E(0) \quad (6)$$

여기서,  $E(x_m)$ 는 전극 중심으로부터 전기장이  $d_m$  만큼 벗어나는 위치에서의 전기장 세기이다.

한편, Ernst 형상은<sup>[4]</sup> Chang 형상에서 또 하나의  $k_1$  변수를 도입한 conformal 사상에서 시작된다.

$$z = w + k \sinh[w] + k_1 \sinh[2w] \quad (7)$$

마찬가지로  $v$  값과  $k, k_1$  값은 식 (4)에서  $a_2(v)=0, a_4(v)=0$  와  $d_m$ 의 정의에서 구해진다. 그러나 Ernst 형상인 경우 위 세 조건을 연립하여 계산하면 전극 표면에서 최적화된 등전위 값은  $\pi/2$ 와 유효숫자 3자리까지 같은 값이 되므로 실질적으로는  $v_c = \pi/2$ 로 근사하여도 무방하다.<sup>[4]</sup> 결과적으로 Ernst 형상은

$$\begin{aligned} x &= u - k_1 \sinh[2u] \\ y &= \pi/2 + k \cosh[u] \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 여기서  $k_1$ 은  $0.25[1 - (1 - k^2)^{1/2}]$ 이다.

그런데 실제 전극 설계에 있어서  $k$  값을 설정하려면 먼저, 전극 중심으로부터 전기장의 비균일 정도  $d_m$ 에 해당하는  $x_m$ 의 크기를 설정해 주어야 하는데, 이들의 관계를 1% 전기장의 벗어남을 기준으로 할 때(균일 클로우 방전이 되기 위한  $d_m$ 은 전극 설계시 보통 1%로 생각함),<sup>[3]</sup>  $x_m$ 과  $k$ 값과의 관계를 그림 1과 표 1에 각각의 전극 형상에 대해 계산하였다. 이 결과에서 보면  $k=0.001$  부터  $k=0.25$ 까지,  $x_m(\text{Ernst})/x_m(\text{Chang})$ 을 계산하면

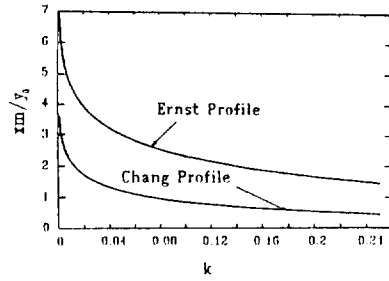
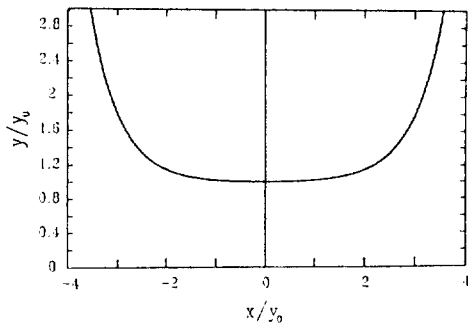


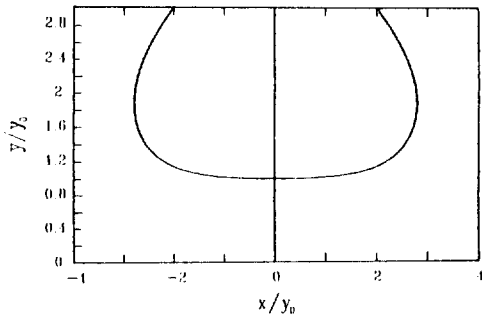
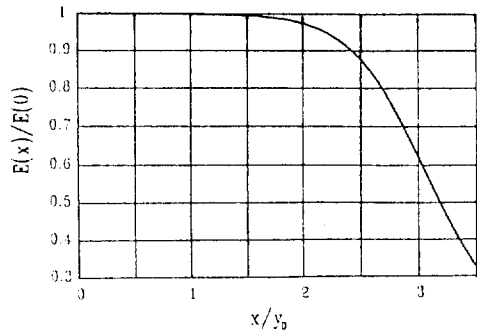
Fig. 1. The calculation of the uniform electric field width ( $x_m$ ) vs.  $k$  for the Chang and Ernst profile at  $d_m=0.01$ .

Table 1. The uniform electric field width ( $x_m$ ) vs.  $k$  for the Chang and Ernst profile at  $d_m=0.01$

$k$	$x_m/y_0$ (Chang)	$x_m/y_0$ (Ernst)
0.001	3.5982229	6.9279150
0.0015	3.3404554	6.5224650
0.002	3.1577959	6.2347984
0.0025	3.0163125	6.0116705
0.003	2.9008860	5.8293648
0.0035	2.8034490	5.6752303
0.004	2.7191841	5.5417154
0.0045	2.6449832	5.4239491
0.005	2.5787235	5.3186056
0.0055	2.5188903	5.2233127
0.006	2.463649	5.1363189
0.0065	2.4142976	5.0562940
0.007	2.3680276	4.9822041
0.0075	2.3250311	4.9132296
0.008	2.2848854	4.8487097
0.0085	2.2472450	4.7881040
0.009	2.2118235	4.7309648
0.0095	2.1783809	4.6769170
0.01	2.1467140	4.6256434
0.015	1.8988327	4.2203903
0.02	1.7262663	3.9329474
0.025	1.5948482	3.7100701
0.03	1.4893454	3.5280419
0.035	1.4016320	3.3742116
0.04	1.3268606	3.2410277
0.045	1.2619093	3.1236191
0.05	1.2046503	3.0186599
0.055	1.535697	2.9237779
0.06	1.1075531	2.8372215
0.065	1.0657569	2.7576604
0.07	1.0275276	2.6840607
0.075	0.9923493	2.6156025
0.08	0.9598078	2.5516250
0.085	0.9295655	2.4915877
0.09	0.9013443	2.4350426
0.095	0.8749122	2.3816146
0.1	0.8500738	2.3309862
0.15	0.6619349	1.9335436
0.2	0.5372073	1.6562131
0.25	0.4453073	1.4454625



(a) Chang Profile ( $k=0.02$ )



(b) Ernst Profile ( $k=0.02$ )

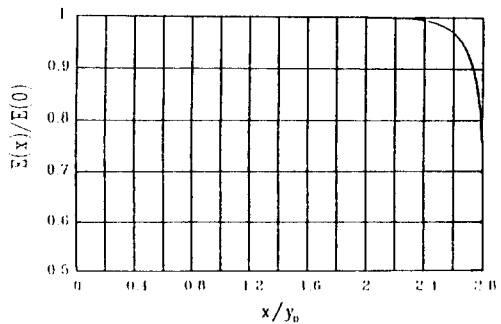


Fig. 2. The comparison of electrode shape and electric field between Chang and Ernst profile at  $k=0.02$ .

Ernst 형상이 Chang 보다 상대적으로 2배-3배 정도로 균일 전기장 분포가 넓게 유지됨을 나타낸다. 그림 2는 대표적으로  $k=0.02$ 인 경우 각각의 전극 형상과 전극 표면에서의 전기장 크기를 나타내었다. 이 경우 전기장의 크기가 중심으로부터 1% 이내로 벗어나는 위치를 계산하면 Ernst 형상이 Chang 형상보다 2.3배로 넓게 전기장이 균일함을 보여주고 있으며, 균일 방전을 위한 전극 설계시 Ernst 형상을 이용하는 것이 더 유리함을 알 수 있다.

실제 본 논문에서 제시한 도움표를 이용하여 Ernst 형상의 레이저 전극을 설계할 때, 먼저 구성하려는 레이저 chamber의 공간에 적합한  $x_m$ 을 정해준 뒤, (가령, 전극 간격 1cm, 방전 폭 4cm인 전극을 설계하고 싶으면 표 1에서 Ernst 형상인 경우,  $x_m/y_0=4$ 이므로  $k=0.02$ 를 택한다. 여기서  $y_0$ 는  $x=0$ 에서 전극까지의 높이이며  $2y_0$ 가 전극의 간격이 된다.) 그림 1을 참고로  $k=0.15$ 값과  $v_r = \pi/2$ 를 이용하여  $u$ 를 매개 변수로 하여 (8)식으로 설계한다. 여기서 주어진 레이저 chamber 내에서 전극의

크기를 보다 최적화하려면  $k$ 값을 0.15에서 조금씩 달리 하여 (8)식을 다시 설계한다.

### III. 결 론

결론적으로 횡여기 방식을 이용한 레이저에서 효율적인 방전을 시키기 위해서는 균일한 전기장의 분포가 Chang 형상보다 2배-3배 정도 넓은 Ernst 형상의 전극을 사용하여야 하며 전극형상 설계시 초기  $k$ 값 설정에 도움표를 제공하여 설계가 간편해짐을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 전춘생, "방전·고전압 공학"(동명사, 서울, 1990), p. 99-100.
- [2] A. Harrison, A Computer Study of Uniform-Field Electrodes, Br. J. Appl. Phys. **18**, 1617 (1967).
- [3] T. Y. Chang, Improved Uniform Field Electrode

Profiles for TEA Laser and High-Voltage Applications, Rev. Sci. Instrum. **44**, 405 (1973).

[4] G. J. Ernst, Uniform Field Electrodes with Minimum Width, Opt. Comm. **49**, 275 (1984).

### **Comparison of Laser Electrodes for Efficient Uniform Discharge**

Dong-Hwan Kim, Hong Chu and Sang-Sam Choi

*Applied Physics Lab. Korea Institute of Science and Technology*

(Received: February 21, 1991)

Calculation and comparison of the design parameter between Chang and Ernst profile that can be used for the uniform discharge in excimer or TEA CO<sub>2</sub> laser are carried out. This result can be used to establish the initial  $k$ -value in the design of electron. Also, calculation shows that Ernst profile is 2-3 times superior to Chang profile in uniformity of electric field with respect to the same  $k$ -value ( $0.001 \leq k \leq 0.25$ ).