

# 2차원 시뮬레이션을 이용한 전극 간격에 따른 방전셀 내부의 특성 연구

## A Study on the Characteristics on a Discharge Cell by the Electrode Gap Using 2-D Simulation

이 돈 규<sup>\*</sup>

Don-Kyu Lee<sup>\*</sup>

### Abstract

Although different types of discharge cells exist, in common it is the primary goal for all discharge cells to have lower drive voltages and higher efficiency characteristics. To improve these factors, many studies are conducted that prolong the discharge path inside the discharge cell or change the composition of the working gas.

In this paper, the two-dimensional fluid simulation was used to calculate the discharge voltage (firing voltage and sustain voltage) and the change in luminance and luminous efficacy according to the change in gap distance between discharge electrodes. In addition, we looked at changes in various charged particles, exciting particles and VUV particles, and studied the causes of the resulting values.

### 요 약

다양한 종류의 방전 셀이 존재하고 있지만, 공통적으로 모든 방전 셀은 보다 낮은 구동 전압에서 보다 높은 효율 특성을 가지는 것을 우선적인 목표로 한다. 이러한 특성 개선을 위해 방전셀 내부의 방전 경로를 길게 하거나 구동 가스의 성분을 변화시키는 연구가 많이 이루어진다. 본 논문에서는 2차원 유체 시뮬레이션을 이용하여 방전전극 사이의 간격에 따른 방전 전압 (개시전압 및 유지전압) 및 휘도와 효율의 변화를 계산하였다. 또한, 다양한 하전입자와 여기입자 및 과장별 진공자외선의 변화를 살펴보고 휘도와 효율의 원인을 연구해 보았다.

*Key words : discharge cells, gap distance, 2-D simulation, discharge voltage, luminous efficacy, VUV particles. charged particles*

### 1. 서론

가장 대표적인 방전 셀은 전극위에 유전층이 있고, 각각의 독립된 구조에서 내부의 강한 방전을 발생시키는 유전-격벽 방전 셀(Dielectric Barrier Discharges Cell, DBD)이다. 다양한 방전 셀의 특

성 개선을 위한 연구가 진행되고 있으며, 모든 방전 셀은 공통적으로 보다 낮은 구동전압을 가지고, 보다 높은 발광효율을 필요로 한다. 유전-격벽 방전 셀은 비균형 플라즈마 조건이 저기압에서의 방전이나, 빠른 펄스 고압 방전 또는 전자 빔 주입과 같은 다른 방법보다 훨씬 더 간단한 방법으로 제작

\* Dept. of Electrical Engineering, Dong-Eui University

★ Corresponding author

E-mail : donkyu@deu.ac.kr, Tel : +82-51-890-1666

Manuscript received, Jun. 9, 2019; revised, Jun. 11, 2019; Jun. 17, accepted, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

될 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 산업용 오존 생성[1], 오염 제어[2], 플라즈마 화학 증착 및 표면 활성화[3], eximer 램프의 여기, 다양한 물질의 표면 개조[4], 디스플레이 등으로 활용이 가능하다.

본 논문에서는, 방전 유지 전극 사이의 간격에 따른 방전 특성을 2차원 유체 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 우선, 전극 간격에 따라 방전개시전압 및 방전유지전압을 계산한 후, 방전이 가능한 전압 영역에서의 휘도와 광효율을 계산하였다. 이 계산된 결과 값의 원인을 분석하기 위해 전자와 Xe<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>, XeNe<sup>+</sup>의 밀도변화를 알아보고, 그 후 발광과 관련이 깊은 여기입자(Xe<sup>\*3P<sub>1</sub></sup>, Xe<sup>\*3P<sub>2</sub></sup>, Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Xe<sup>\*\*</sup>)들 및 파장별 진공자외선(147nm, 150nm, 173nm)의 양을 계산하였다.

## II. 시뮬레이션 모델

본 논문에 사용된 시뮬레이션은 아래에 나타낸 연속방정식(식1), drift-diffusion approximation(식2), 포아송 방정식(식3)으로 구성된 2차원 유체 시뮬레이션을 사용하였다.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_i = S_i \tag{식1}$$

$$\Gamma_i = -D_i \nabla n_i + \text{sgn}(q_i) \mu_i n_i E_i \tag{식2}$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\sum_i q_i n_i \tag{식3}$$

식에서 아래 첨자로 사용되고 있는 i는 각각의 입자 종류에 의해 달라질 수 있으며 대표적으로 이온, 전자 그리고 중성입자를 들 수 있다. (식1)은 연속 방정식을 표현한 식으로 n은 입자의 밀도를 나타내며 Γ 은 플럭스, S<sub>i</sub>는 생성되거나 소멸되는 이온의 양을 나타낸다. (식2)는 drift-diffusion에 의한 입자 흐름의 운동량 전달을 표현한 식으로, D는 diffusion coefficient를 μ는 이동도를 나타내고, sgn(q)는 하전입자의 부호에 따라 결정되게 된다. 일반적인 방전셀 내부의 압력은 400torr 이상으로 매우 높기 때문에 전자와 중성기체와의 충돌이 매우 빈번하고, 따라서 운동량 보존 법칙을 사용하여 간단히 처리될 수 있다. (식3)은 전기장에서의 포아송 방정식을 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 진행한 방전셀 내부와 같이 입자간의 충돌이 빈번한 상황

에서는 에너지를 흡수한 국소 영역에서 충돌에 의한 에너지 소비를 하게 되며, 이에 관련된 변수들은 전기장과 기체 압력의 비인 E/p의 함수로 표현할 수 있는데, 이를 LFA(Local Field Application)라고 한다.

시뮬레이션으로 구동한 구동가스는 Ne 92%와 Xe 8%가 혼합된 가스를 적용하였으며, 이로 인해 고려한 입자들은 전자, Ne<sup>+</sup>, Xe<sup>+</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>, Ne<sub>2</sub><sup>+</sup>, NeXe<sup>+</sup> 등의 이온들과 Xe<sup>\*3P<sub>1</sub></sup>, Xe<sup>\*3P<sub>2</sub></sup>, Xe<sub>2</sub><sup>\*(O<sub>u</sub><sup>+</sup>)</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>2\*(<sup>1</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>\*(<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)</sup>, Xe<sup>\*\*</sup> 등의 여기 입자들이 있다. [5-8]

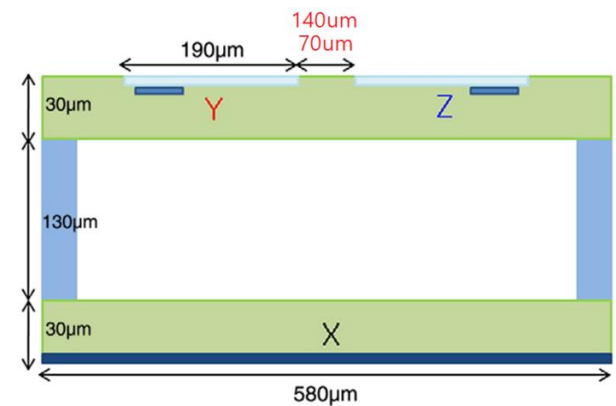


Fig. 1. Cell structure used in the simulation.  
그림 1. 시뮬레이션에 사용된 방전셀의 구조

Table 1. the specification of test discharge cell.  
표 1. 테스트 방전 셀의 스펙

Front panel		Rear panel	
ITO electrode width	190 μm	Address electrode width	100 μm
electrode gap	70 μm, 140 μm	Dielectric thickness	30 μm
Bus electrode width	80 μm	Barrier rib height, width	25 μm, 30 μm
Dielectric thickness	30 μm	Phosphor thickness	30 μm
Working gas : Ne (92%) + Xe (8%)			
Gas pressure : 400 Torr (53.3 kPa)			
Cell size : 580 * 190 μm <sup>2</sup>			

그림 1과 표 1은 시뮬레이션을 진행한 방전셀의 구조 및 스펙이다. 상판에 2개의 방전전극(Y, Z)과 하판에 1개의 어드레스 전극(X)이 존재하며, 방전의 안정성을 위하여 상판 2개의 전극사이에서 발생하는 방전 개시전압과 유지전압의 중간 값에 해당하는 전압을 하판의 어드레스 전극에 인가해 주었다. 시뮬레이션에서는 모든 방전셀의 변화를 계산

할 수 없으므로 단 한 개의 셀 내부 변화만 고려하였고, 이 때문에 충분히 안정된 방전이 일어난 후의 시간에서 셀 내부의 변화를 측정한다. 방전개시전압은 안정된 방전이 이루어지는 최소전압으로 결정하고, 방전유지전압은 방전이 안정화 된 이후에 전압을 낮추어가며 정상적인 방전이 일어나는 최저전압으로 결정한다.

### III. 시뮬레이션 결과

그림 2는 70 $\mu\text{m}$ 과 140 $\mu\text{m}$ 의 전극 간격에 따른 방전개시전압(firing voltage) 및 방전유지전압(sustain voltage)을 나타낸다. 140 $\mu\text{m}$  간격을 가지는 방전셀은 70 $\mu\text{m}$  간격을 가지는 셀보다 방전개시전압과 유지전압이 높은 것을 확인 할 수 있고, 주파수가 증가함에 따라 결과값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 통 겹 구조의 방전개시전압과 유지전압은 각각 슷 겹 구조보다 약 10%와 15% 더 높다.

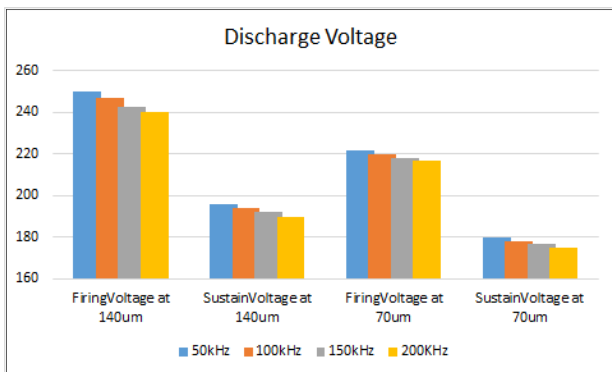


Fig. 2. Variation of discharge voltage as a function of electrode gap and frequency.

그림 2. 전극 간격과 주파수에 따른 방전 전압의 변화

그림 3은 50kHz의 구동 주파수에서 70 $\mu\text{m}$ 와 140 $\mu\text{m}$ 의 전극 간격에 따른 (a) 휘도와 (b) 발광효율의 변화를 보여준다. 140 $\mu\text{m}$  겹을 가지는 방전셀은 70 $\mu\text{m}$  겹을 가지는 셀보다 휘도와 발광효율이 각각 약 25%와 20% 더 높다. 글로우 방전에서 양광주영역의 플라즈마가 음극 영역보다 더욱 효율적인 제논 여기종과 진공자외선을 생성시킨다는 사실은 잘 알려져 있다. 따라서 방전 셀의 효율을 높이는 매우 자연스러운 방법은 양광주영역의 플라즈마를 많이 생성하게 하는 것이다. 즉, 충분히 낮은 전계에서는 더욱 많은 양의 제논 여기종들을 생성하게 되고 적

은 네온 여기종을 생성시킨다 [10]. 전극 사이의 간격이 길어지면 70 $\mu\text{m}$  겹에 비해 내부의 E/p 값이 낮기 때문에, 전자는 이온화보다 여기화에 더 많은 에너지를 소비한다. 따라서 전극사이의 간격이 커지면 일반적인 간격을 가지는 방전셀에 비해 자외선을 생성하는데 더 효율적일 수 있다. 하지만, 이 또한 그림 2과 같이 방전 전압의 상승을 동시에 유발한다.

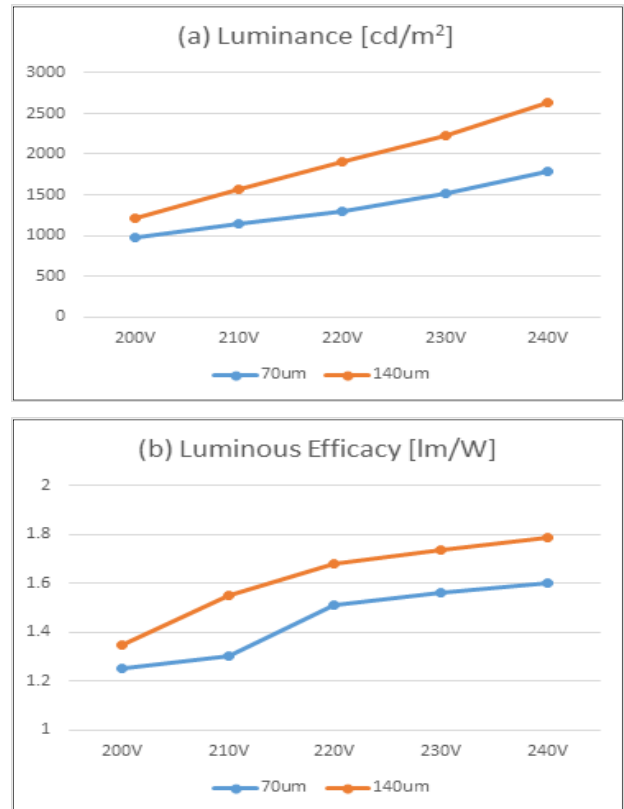
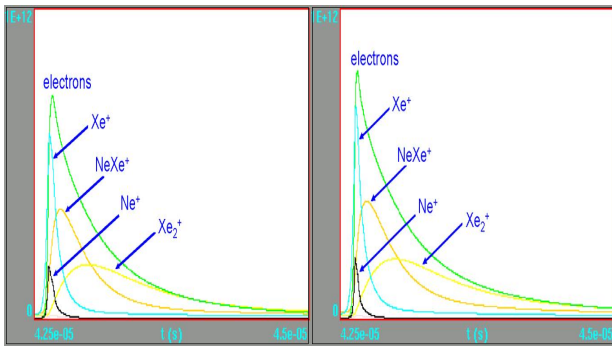


Fig. 3. Variation of (a) luminance and (b) luminous efficacy as a function of electrode gap.

그림 3. 50kHz 구동 주파수에서 전극 간격에 따른 (a) 휘도와 (b) 발광효율의 변화

그림 4(a)와 (b)는 각각 70 $\mu\text{m}$ 와 140 $\mu\text{m}$ 의 전극 간격에서 방전으로 인해 생성되는 다양한 하전입자(전자,  $\text{Xe}^+$ ,  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Xe}_2^+$ ,  $\text{XeNe}^+$ )의 변화를 실시간으로 계산하여 나타내었다. 각 전극 간격을 가지는 방전 셀에서 결정된 방전유지전압에서 충분히 안정된 방전을 일으킨 후 시뮬레이션 하였고, 구형파의 한 사이클 구간에서의 결과를 나타내었다. 전극 간격 길어지면 방전전압이 15V 이상 증가하지만 방전이 유지되는 가장 낮은 전압인 방전유지전압에서 방전으로 생성되는 하전입자의 양은 약간 증가하지만 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

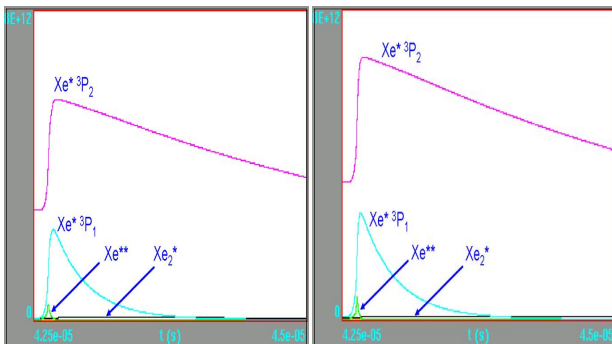


(a) electrode gap of 70µm (b) electrode gap of 140µm

Fig. 4. Variation of the charged particles(electron, Xe<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>, XeNe<sup>+</sup>) as a function of electrode gap.

그림 4. 전극 간격에 따른 하전입자들 (전자, Xe<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>, Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>, XeNe<sup>+</sup>)의 변화

그림 5(a)와 (b)는 각각 70µm와 140µm의 전극 간격에서 방전으로 인해 생성되는 다양한 여기입자(Xe<sup>3</sup>P<sub>1</sub>, Xe<sup>3</sup>P<sub>2</sub>, Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Xe<sup>\*\*</sup>)의 변화를 나타내었다. 다양한 여기입자들의 생성량을 모두 적분하면 최종적으로 측정되는 휘도 값일 수 있고, 이는 광 효율과 직접적인 관련이 있다.



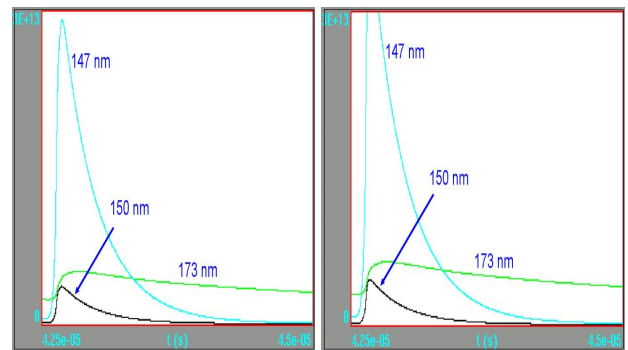
(a) electrode gap of 70µm (b) electrode gap of 140µm

Fig. 5. Variation of the exciting particles(Xe<sup>3</sup>P<sub>1</sub>, Xe<sup>3</sup>P<sub>2</sub>, Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Xe<sup>\*\*</sup>) as a function of electrode gap

그림 5. 전극 간격에 따른 여기입자들 (Xe<sup>3</sup>P<sub>1</sub>, Xe<sup>3</sup>P<sub>2</sub>, Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Xe<sup>\*\*</sup>)의 변화

그림 6(a)와 (b)는 전극 간격에 따른 방전으로 인해 생성되는 147nm, 150nm, 173nm의 진공자외선의 변화를 나타내었다. 그림 5에서 생성되는 Xe<sup>3</sup>P<sub>1</sub>은 147nm의 진공자외선을 생성하고, Xe<sup>3</sup>P<sub>2</sub>는 173nm의 진공자외선을 생성한다고 알려져 있다. 상대적으로 생성되는 양이 적은 150nm는 Xe<sup>3</sup>P<sub>1</sub>의 일부와 Xe<sup>\*\*</sup>으로 생성된다. 한 주기에서 방전으로 생성되는 진공자외선의 양을 적분하면 휘도 값의 결과에 비례한다. 140µm의 전극 간격을 가진 방전 셀에

서 생성되는 총 진공자외선의 양은 합해보면 70µm 간격 셀의 양보다 약 20% 증가하며, 이 값은 휘도와 발광효율이 증가되는 원인이 된다. 그림 3 (a)의 휘도 값이 룡 겹에서 약 25% 정도 증가하는 결과와 잘 일치한다. 70µm 겹 셀의 경우 147nm의 생성 양의 분포는 전체 진공자외선 중 약 45%이며, 150nm와 173nm의 생성은 각각 약 5%, 50%이다. 140µm 겹 셀의 경우는 전체 진공자외선 중 147nm의 양은 47%이고, 150nm, 173nm의 양은 각각 약 5%, 48%이다. 즉 각각의 진공자외선에 따른 생성량은 전체적으로 전극간격이 증가함에 따라 증가하고, 특정 파장의 자외선 증가를 일으키지는 않았다.



(a) electrode gap of 70µm (b) electrode gap of 140µm

Fig. 6. Variation of the VUV by 147nm, 150nm, 173nm as a function of electrode gap.

그림 6. 전극 간격에 따른 147nm, 150nm, 173nm 자외선의 변화

#### IV. 결론

본 연구에서는 2차원 유체 시뮬레이션을 이용하여 방전 셀 내의 전극 간격을 변화에 따른 방전 특성의 원인을 조사한다. 전극 간격이 길어짐에 따라 휘도 및 광효율이 각각 약 25%, 20% 증가하지만, 그에 따라 방전개시전압과 방전유지전압도 약 15%, 10% 정도 증가한다. 실제 방전셀을 구동시키는 방전유지전압에서 생성되는 하전입자들과 여기입자들 그리고 이로 인해 생성되는 각종 파장에서의 진공자외선의 양을 살펴보았다. 전극 간격이 길어짐에 따라 방전 셀 내부의 E/p 값이 낮아지게 되어 전리에 사용되는 에너지보다 여기에 사용되는 에너지의 분포가 많아지게 되어 하전입자들의 양은 거의 변화하지 않으나, 여기입자들의 양이 증가하여 이로 인해 진공자외선의 양이 약 20% 증가하였다. 또한, 이때 생성되는 진공자외선은 특정 파장의

자외선이 증가하지 않고 전체적인 생성양이 증가하였다.

*Letters* Vol.147 (SMART DSC-2017), pp.511-514, 2017.

## References

- [1] U. Kogelschatz, "Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.30, No.4, pp.1400-1408, 2002.  
DOI: 10.1109/TPS.2002.804201
- [2] K. Takaki, K. Urashima, and J-S. Chang, "Ferro-electric pellet shape effect on C/sub 2/F/sub 6/ removal by a packed-bed-type nonthermal plasma reactor," *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vo.132, No.6, pp.2175-2183, 2004.  
DOI: 10.1109/TPS.2004.837614
- [3] O. Goossens, E. Dekempeneer, D. Vangeneugden, R. Van de Leest and C. Leys, "Application of atmospheric pressure dielectric barrier discharges in deposition, cleaning and activation," *Surf. Coat. Technol.*142-144, pp.474, 2001.
- [4] G. Borcia, C. A. Anderson and N. M. D. Brown, "The surface oxidation of selected polymers using an atmospheric pressure air dielectric barrier discharge," *Appl. Surf. Sci.* Vol.225, pp. 186-197. 2004. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.10.002
- [5] Don-Kyu Lee, *Advanced Science and Technology Letters*, Vol.145 (NGCIT 2017), pp.21-27, 2017.  
DOI: 10.14257/astl.2017.145.05,
- [6] Seung Bo Shim a, Sung-Yong Cho a, Don Kyu Lee b, In Cheol Song a, Chung Hoo Park a, Ho-Jun Lee a, Hae June Lee, *Thin Solid Films* 518 pp.3037 - 3041, 2010.
- [7] Shin Young Kyo, Shon Chae Hwa, Kim Woong, Lee Jae Koo, "The Voltage-Pulsing Effects in AC Plasma Display Panel," *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol.27 pp.1366-1371, 1999.  
DOI: 10.1109/27.799814
- [8] Lee Hae June, Kim Hyun Chul, Yang Sung Soo, Lee Jae Koo, *Phys. Plasmas* 9 (2002) 2822.
- [9] Don-Kyu Lee, *Advanced Science and Technology Letters* Vol.147 (SMART DSC-2017), pp.515-519, 2017.
- [10] Don-Kyu Lee, *Advanced Science and Technology*

## BIOGRAPHY

### Don-Kyu Lee (Member)



2002 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.  
2004 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.  
2007 : PhD degree in Electrical Engineering, Pusan National University.  
2008~ : Professor in Electrical Engineering, Dong-Eui University.