

光束法을 이용한 氣體의 電離係數 測定

論 文
34~7~5

Measurement of the Ionization Coefficient in Gases by the Luminous-flux Method

白 龍 鉉* · 河 聖 哲** · 李 福 熙*** · 金 喜 澤**** · 金 廷 燮****
 (Yong-Hyun Paek · Sung-Chul Ha · Bok-Heui Lee · Hee-Taek Kim · Jung-Sup Kim)

Abstract

The Townsend primary ionization coefficient α was measured by the luminous-flux method using the fact that the intensity of radiant light is proportional to electron density in the Townsend discharge domain.

The ranges of measurements were $15 < E/P_0 < 210$ [V/cm. Torr] for He gas and $10 < E/P_0 < 250$ [V/cm. Torr] for Ne gas respectively.

Comparing with generally used spatial current growth method, this method takes advantage that the primary ionization coefficient α is directly obtained without influence of the 2nd ionization coefficient γ as a function of electrode distance.

In this paper, using Photo Multiplier Tube operated by Single Photo-electron Event, the value of α/P_0 was measured by direct current detection signal method and compensated this value. As the results it was found that the values of the primary ionization coefficient α obtained in this experiment agreed well with the value of Haydon and Townsend primary ionization coefficient for He gas and Hoog for Ne gas by the same method respectively.

1. 緒 論

Townsend 의 第 1 電 係數를 구하는 방법에는 定常 Townsend 法, 光束法, 電子沙汰크기의 統計의 分布에 의한 방법, 마이크로波法 등이 있는데, 低 Townsend 영역에서는 주로 定常 Townsend 法과 光束法이 사용되어져 왔다.^{1), 6), 8)}

定常 Townsend 法은 제 2 전리계수 γ 가 거리의 함수로 나타나므로 종래에는 γ 를 일정하다고 간주하고 제 1 전리계수 α 를 구하여 왔다. 광속법은 1985년 C-orrigan과 A. Von Engel 등에 의하여 처음으로 실험 보고된 이래,¹⁾ Townsend 放電領域에서 輻射光의 세기가 電子密度에 비례하는 것을 이용하여 γ 의 영향없

이 직접 α 가 구해지는 잇점이 있어 많은 연구가 이루어져 왔다.^{1), 6), 11)}

기체층을 통과하는 電子群은 氣體原子와 충돌하여 원자들을 여기시키거나 電離시킨다. 이때 이온화된 원자의 수보다는 여기된 원자의 수가 상당히 더 많으며, 여기된 원자들은 더 낮은 상태 또는 안정상태로 되돌아가면서 光子를 방출하게 된다. 따라서 여기온도가 일정하다고 하면 방출되는 복사량은 전자밀도에 비례하게 된다. 그러므로 전자밀도의 변화는 음극으로부터 어느일정거리에서 방출되는 복사량을 측정함으로써 알 수 있게 된다. 또한 복사량이 측정되면 α 는 쉽게 구해진다. 근자외선에서 근적외선 범위의 光檢出에 사용되는 光檢出器는 여러가지 종류가 있으며 특히 低雜音이고 微弱光의 검출에는 光電子增倍管이 사용되고 있다.^{3), 4)} 이것은 動作原理에 따라 2가지로 나눌 수 있으며, M.P.E (Multi Photo-electron Event) 와 S.P.E (Single Photo electron Event)인데, 后者는 入射光이 미약할 때 광전자를 시간에 따라 분리하여 관측하는 것이 특징이다.⁵⁾

*正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 大林工專大 電氣科 教授 · 工博
 ***正 會 員 : 仁荷大 大學院 電氣工學科 博士課程
 ****正 會 員 : 仁荷大 大學院 電氣工學科 碩士課程
 接受日字 : 1985年 5月 1日

또한 미약광의 검출방식에는 출력전류의 평균을 구하는 방법인 S·P·C (Single Photo-electron Counting) 방법과 D·C 방식이 있는데, 前者는 S/N比가 有限이고 출력의 교류성분이 잡음으로 나타나며, S/N比는 단위시간당 방출되는 Signal 光電子數에 비례하는 것이 특징이다.^{5), 7)}

본 연구에서는 S·P·E로 동작하는 P·M Tube를 이용하여 저류검출방식으로 Ne gas 중에서는 $10 < E/P_0 < 250$ [V/cm.Torr], He gas 중에서는 $15 < E/P_0 < 210$ [V/cm.Torr], 범위에서 α/P_0 를 측정하고 광속증배관의 잡음으로 인한 誤差에 대한 補正을 취하여 결과를 얻었으며, 다른 연구자들의 측정결과와 比較 檢討하여 보았다.

2. 理 論

기체방전중에서 제 1 전리계수(총돌전리계수) α 는 한개의 전자가 電界方向으로 단위거리를 이동하는 사이에 충돌에 의하여 기체분자(원자)를 전리시키는 평균회수로서 여러가지 방법이 있지만, 그중에서 定常 Townsend 방법인 非自續放電에서 暗流空間成長式

$$\frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha(d-d_0)}}{1 - \gamma \{e^{\alpha(d-d_0)} - 1\}} \quad (2-1)$$

이 많이 이용되어져 왔다.^{7), 8)} 이방법은 E/P_0 를 일정하게 유지하고 전극간격 d 를 변화시켜 暗電流를 측정하고, 그거리와 放電電流의 관계로부터 α 를 구하는 방법으로, 이때에 空間電荷에 의한 不平等電界가 없어야 하며 電子에너지分布가 평형되어야 하는 등의 조건이 필요하다. 한편 이때의 방전은 非自續이기 때문에 外部照射에 의한 初期電子의 공급이 필요하다. 이경우 제 2 전리계수 γ 는 일정하다고 가정하지만 실제로 γ 는 이온, 準安定分子 및 光子가 관여되어 있기 때문에 전극간격에 따른 영향을 당연히 고려하여야 한다. 그러나 광속법은 γ 의 영향없이 기체중에서의 전자증배에 의한 제 1 전리계수 α 를 측정할 수 있다.^{6), 10)} 평등전계중에서 初期電子數 N_0 에 대한 초기전류를 I_0 라고 하면 음극으로부터 X 만큼 떨어진 점에서의 전류 I_x 는

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{N_x}{N_0} \approx e^{\alpha x} \quad (2-2)$$

으로 電子數는 증배되어 진다.

定常狀態에서의 全電流 I 는 전극간격의 어떤 위치에서도 감지 않으면 안된다. 그러나 I 와 I_x 가 다른 것은 이온電流때문이다.

電子와 氣體分子와의 충돌에 의한 勵起의 比率은

α 와 유사한 ϵ 으로 나타낼 수 있다. 즉 ϵ 은 진계 방향에 대한 단위거리당 1개의 전자에 의한 勵起數이다. 理想的으로는 勵起의 여러가지 形態에 대하여 여기계수는 측정에 의하여 얻어진다. 그러나 巨視的으로는 방전중에서의 全光放出量을 측정함으로써 알 수가 있다. 電子流의 微小體積當의 광방출량은 그림 1에서 알 수 있는바와 같이 N_x 에 비례하게 된다.

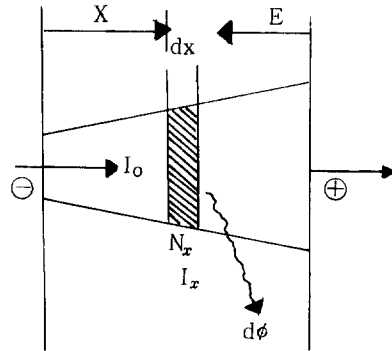


그림 1. 電荷의 増倍와 輻射

Fig. 1. Multiplication of charges and emission of light.

그러므로 (2-2)식으로부터

$$d\phi = \epsilon N_x \cdot dx = \epsilon N_0 \cdot e^{\alpha x} \cdot dx \quad (2-3)$$

으로 된다.

$d\phi$ 는 全輻射量 ϕ 에 대한 미소부분 dx 에서의 복사량이다. $d\phi$ 는 I_x 에 비례하므로 X 에서의 전복사량 $\phi(x)$ 는 $\phi(x) \propto e^{\alpha x}$ (2-4)으로 표시된다. 따라서 光量은 거리에 따라 指數函數的으로 증가한다. 또한 (2-4)식을 對數로 취하면

$$\ln \phi(x) \propto \alpha x \quad (2-5)$$

로 되어 $\ln \phi(x)$ 와 x 의 관계에서 제 1 전리계수 α 가 결정된다.⁶⁾

3. 實驗裝置 및 方法

본 실험에 사용한 실험장치는 사진 1과 같으며, 이의 개략도는 그림 2에 나타내었다.

3.1 測定回路

본 실험에 사용한 전극은 近似 Rogowski 型으로 제질은 스테인레스 (SUS 304)이며, 최대외경은 $\phi 80$ [mm]로 음극의 중앙에 $\phi 25$ [mm]의 용융석영이 부착되어 있다. 이 전극은 아세톤으로 세척한 다음

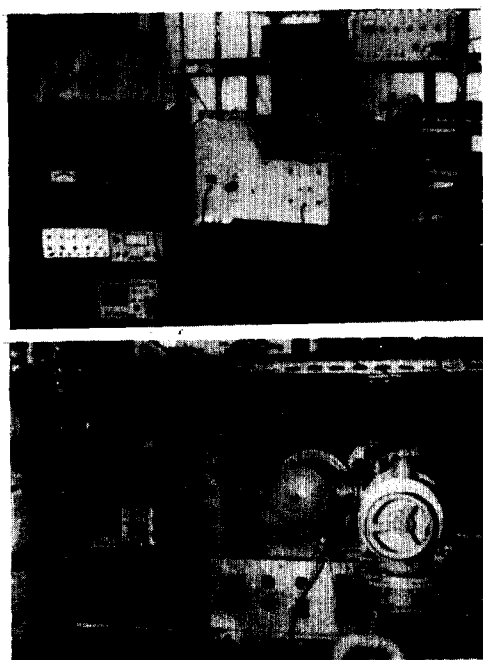


사진 1. 실험 장치

Photo 1. Experimental apparatus

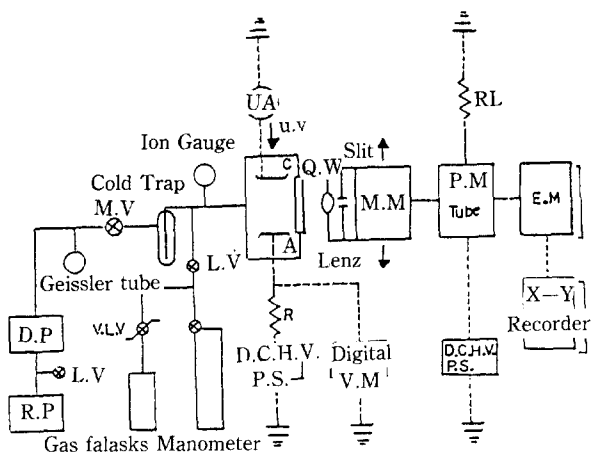


그림 2. 실험 장치의 개략도

Fig. 2. Blockdiagram of experimental apparatus

1.5×10^{-5} [Torr]의 진공중에서 Au를 증착시켜 사용하였다.

초기전자를 방출시키기 위하여 저압수은램프로 수정창을 통하여 자외선 (2537\AA)을 음극의 후방에서照射시켰다. 전극간격의 조절은 마이크로메타를 사용 $\frac{1}{100}$ [mm]의 精度로 연속조절이 가능하도록 하였다. 兩電極間에는 직류안정화전장치 (Fluke 製, Model 410B, 0~10KV)로 電壓을 인가하였으며, 이때 흐르는 전류는 微小電流計 (YEW 製, Type 2011,

Class 0.5)로 측정하였고 兩電極間의 電壓은 1000:1의 分壓比를 가지고 있는 Probe (Fluke 製, Model 80K40KV)를 사용하여 디지털볼트미터 (Fluke 製, Model 8600A)로 측정하였다. 또한 복사광은 수정창을 통하여 수정렌즈로 集束되며, Slit를 통과하여 分光器 (Bausch and Lomb 製, Model Spectromic 505)에 입사되고, 分光된 빛은 2×10^6 의 電流增倍率을 가지는 P·M Tube (日製 Hamamatu 製品, Model R 647-04)를 사용하여 광속을 증배시켰으며, 이때 P·M Tube의 전류를 Electrometer로 측정하였다.

3.2 排氣시스템

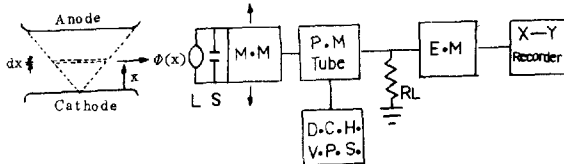
放電管內의 排氣는 Rotary Pump (200ℓ/min)와 Diffusion Pump (500ℓ/sec)를 조합한 2단배기계를 사용하였으며, 眞空槽內의 불순물을 제거하고 眞空度를 높이기 위하여 액화질소로 냉각되는 Cold Trap을 사용하였다. 眞空度는 Pirani gauge (Edwards 製品, Model 07-D386-12-000)와 熱陰極電離眞空計 (Tokuda 製品, Model MFT-4)로 측정하였으며, 氣體의 압력은 精度를 높이기 위하여 실리콘오일 (VLVAC F-5, 比重 1.09)를 사용한 오일마노미터로 측정하였다.

3.3 實驗方法

그림 3는 광속법을 이용한 직류검출방식의 Diagram을 나타낸 것이다.

실험방법 및 순서는 다음과 같다.

- i) 실험에 사용한 기체는 Ne, He 이다.
- ii) 방전의 형태는 자외선을 照射시켜 초기전자를 발생시켜주는 非自續 Townsend 放電이다. 또한 電流



L: Quartz Lens (f: 50mm φ:30mm)

S: Slit (0.5mm)

P.M.: Photo multiplier tube

E.M.: Electro Meter

D.C.H.V.P.S.: D.C. High Voltage Power Supply (0~3.1kv)

M.M.: Monochro Meter

그림 3. 광속측정법의 개략도

Fig. 3. Diagram of the luminous-flux method.

値는 $He: 10 \times 10^{-7}$ [A] 이었다.

iii) 방전을 안정화시키기 위하여 100 [KΩ]의 저항을 직렬로 연결하였다.

iv) 가속된 방전역은 전극전면에 확산되고, 이때 방전관내의 미소구간 dx의 방전광이 수정창을 통하여 나오며, 렌즈에 의해 集束되고 分光器의 Slit로 입사되도록 조절한다.

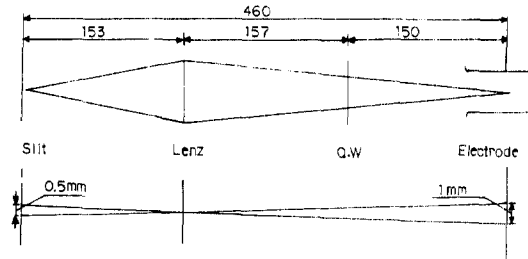


그림 4. Slit와 Lenz에 의한 dx의 결정.
Fig. 4. Determination of dx due to Slit and Lenz.

V). 입사 Slit 폭은 0.5(mm)이고 이것을 통해 분광기에 입사된다.

• Vi). 전자와의 충돌에 의해 여기된 원자의 發光遷移中에서 특정한 천이에 대응하는 波長의 빛을 분광기로 선택하여 PM Tube에 입사되며, 측정에 사용된 빛의 파장은 Ne에서 5852 Å 이었다.

Vii). 이와 같은 방법으로 전극간의 구간 l [Cm]마다 복사강도를 측정하였다.

3.4 補正實驗

本 實驗方式에서 가장 문제가 되는 것은 광전자증배관의 잡음에 대한 영향이다. 이러한 영향을 최소로 하기 위하여 다음과 같은 실험을 하고 補正을 취하였다.

i). 가정

광량 ϕ 는 거리의 제곱에 반비례하므로 $\phi = \frac{A}{X^2}$ 가 된다.

여기서, X: 광원에서 光電面까지의 거리, A:定數이다.

전자밀도 $n(x)$ 도 $n(x) \propto \frac{A}{X^2}$ 이므로 ϕ 와 $n(x)$ 는 線形性을 가지게 된다.

ii). 실험

60 [W]의 백열전구를 광원으로 하여 분광기까지의 거리 X를 조절하면서 거리 X에 대응하는 전자밀도를 Electrometer로 측정한다. 이값을 數數로 取한 다음 그기울기를 최소자승법으로 구한다.

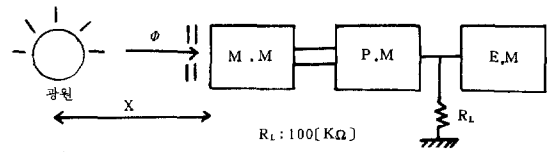


그림 5. 補正 실험도
Fig. 5. Compensation experimental diagram.

4. 實驗結果 및 檢討

4.1 진공특성

본 실험에서는 초기전자를 방출시키기 위하여 음극의 후방에서 자외선을 照射하는 방법을 사용했는데, 이방법은 종래의 陽極孔에서 자외선을 조사시키는 방법에 비하여 전극간격이 극히 짧은 경우 전계의 불평형이 생기지 않고 陽極孔주위의 광전자방출을 방지할 수 있으므로 順逆方向의 眞空電流의 比를 70 : 1 정도로 할 수 있는 잇점을 가지고 있으며, 본 시스템의 진공특성은 그림 6과 같다.

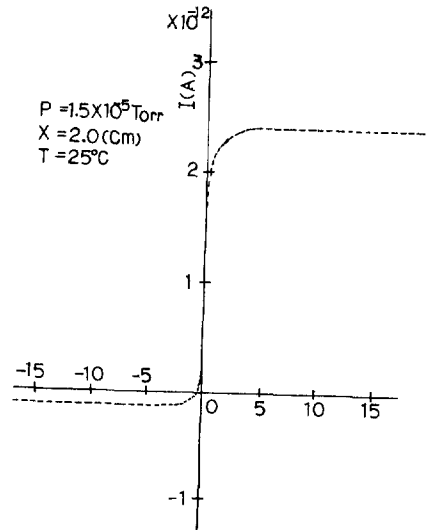


그림 6. 眞空特性
Fig. 6. Vaccum characteristics.

4.2 補正實驗結果

이실험의 결과는 그림 7과 같으며 기울기를 최소자승법으로 구한 결과 -1.88이 되었다.

이결과로부터 기울기가 가정했던 -2에 미치지 못하고 있으며, 이는 P·M Tube내의 잡음성분때문이라 생각되며 기울기가 -2일때는 잡음은 전혀 없었던 것으로 간주할 수 있을 것이다.

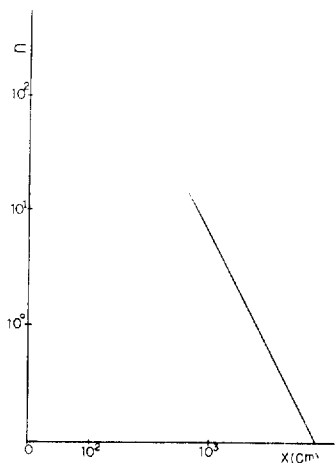


그림 7. 전자밀도와 광원으로 부터의 거리 특성
Fig. 7. The characteristic of electron density and distance from light source.

4.3 He gas의 전리계수

표 1은 $15 < E/P_0 < 210$ (V/cm·Torr)의 범위에서 음극으로부터 Slit까지의 거리 X와 광량 ϕ 에 대한 측정결과이다.

그림 8은 He gas의 α/P_0 와 E/P_0 의 관계를 나타낸 것이다. 이결과 저 E/P_0 의 영역에서는 Haydon의 값⁷⁾과 近似하지만, 고 E/P_0 의 영역에서는 Townsend의 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 본 실험에서 He gas를 사용한 것은 定常氣體中에서 방전현상

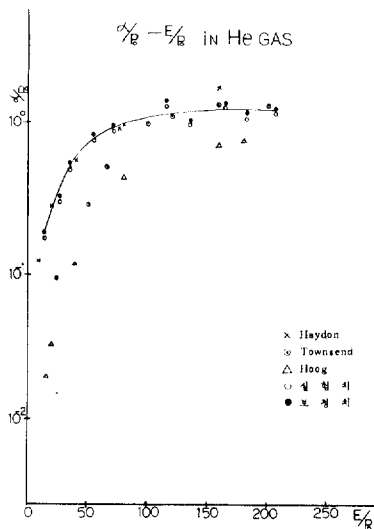


그림 8. He gas의 α/P_0 와 E/P_0 의 관계
Fig. 8. Relation of α/P_0 and E/P_0 in He gas.

을 이해할 때 여기나 전리의 형태가 복잡한 현상을 나타내지 않는 기체를 선택하는 것이 중요하기 때문이다. 分子氣體에서는 分子의 이온화, 여기, 원자의 이온화 등 여러가지의 에너지상관관계가 생기므로 방전현상을 분석하는 것이 곤란하다. 특히 光分析을 하는 경우는 分光스펙트럼의 수가 작은 것이 좋다.

표 1. He gas에서 X에 대한 ϕ 의 측정치

Table 1. Measured Values of ϕ with x in He gas

E/P ₀	15.06		26.40		36.08		52.70		71.68		116.33		136.17		164.90	
ϕ [A.U.]	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치
X(Cm)																
0.1	7	3	19	7.1	36	9.9	14	7.6	33	11	40	9.7	45	23	45	23
0.2	8	4	23	8.2	39	17	20	8.2	38	18	43	16	48	31	47	29
0.3	9	5	28	8.9	48	22	28	9.4	46	23	48	27	54	37	55	32
0.4	9.5	7	35	9.9	59	34	41	12	53	32	59	38	56	39	63	37
0.5	12	8	42	19	69	39	50	19	64	39	71	42	48	40	69	43
0.6	24	9	52	28	83	48	57	31	73	46	82	49	73	46	76	48
0.7	30	10	65	37	90	59	62	43	76	54	88	62	81	53	82	57
0.8	39	18	71	45	92	68	69	52	85	63	91	72	89	61	89	64
0.9	46	31	80	52	93	82	72	59	89	72	97	83	91	69	96	73
1.0	52	37	83	67	93	91	76	67	89	84	99	89	91	78	98	79

표 2. Ne gas 에서 X 에 대한 ϕ 의 측정치
Table 2. Measured Values of Φ with X in Ne gas.

E/P ₀ X(Cm)	11.4		13.7		17.8		32.7		58.5		81.6		176		250	
	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치	실험치	보정치
0.1	5.4	1.0	7.5	3.2	9.2	3.7	8.1	2.3	9.3	6.8	9.6	4.3	6.4	3.8	19	6.4
0.2	5.6	1.8	8.3	3.7	9.1	4.1	8.1	3.4	11	7.2	9.7	5.2	6.7	4.3	21	7.1
0.3	5.9	2.4	8.8	4.3	9.3	4.8	8.2	4.1	13	8.3	9.9	6.3	7.2	5.2	3.4	7.8
0.4	6.4	3.1	9.2	4.9	9.7	5.2	8.9	4.7	14	9.1	13	7.4	8.3	5.7	37	8.3
0.5	7.4	4.2	9.9	5.2	11	5.9	9.3	5.4	18	9.4	19	8.6	9.1	6.6	39	9.1
0.6	7.9	4.7	15	5.7	13	6.3	11	6.7	26	9.7	23	9.7	9.8	7.8	41	9.6
0.7	8.4	5.0	19	6.4	21	6.6	14	7.9	29	11	34	10.3	9.9	8.9	43	9.9
0.8	9.7	5.9	24	7.5	24	6.9	20	8.3	32	16	40	14	10.2	9.6	47	10.3
0.9	11	6.8	27	8.2	24	7.4	26	8.8	24	19	39	24	14	9.8	49	14
1.0	14	7.6	28	8.9	25	7.9	30	9.6	35	28	39	37	19	10.1	51	19

4.4 Ne gas의 전리계수

표 2는 $10 < E/P_0 < 250$ (V/cm · Torr)의 범위에서 광량 ϕ 와 음극에서 Slit까지의 거리 X와의 관계에서 얻은 측정결과이다.

그림 9는 Ne gas중에서 α/P_0 와 E/P_0 의 관계를 나타낸 것이다. 이결과 定常 Townsend 法을 사용한 Kruithof의 값과 광속법(Analogy 方式)으로 구한 Hoog의 값을 本 實驗의 결과와 비교해 볼 때, Hoog의 값에 근사함을 알 수 있다. 그러나 Kruithof의 방법은 제 2 전리계수 γ 가 일정하다고 가정하였는데⁶⁾, 실제로 γ 는 양이온, 準安定分子 및 光子 등에 의한 2차전리작용의 영향을 나타내므로 이결과는 정확하다고 볼 수 없다. 반면에 광속법의 경우는

$$N_x = N_0 e^{\alpha(x-x_0)} \quad (4-1)$$

N_0 : 음극에서 방출되는 초기전자밀도.

N_x : 음극에서 거리 x만큼 떨어진 점의 전자밀도.

인 식에서 알 수 있는 바와같이 광량은 전자밀도 N_x 에 비례하므로 γ 의 영향을 받지 않고 직접 α 를 구할 수 있는 방법인 광속법을 이용한 Hoog의 값이 정확하다고 볼 수 있다.

4.5 附着現象에 대한 고찰

그림 9에서 본 연구의 결과와 Hoog의 값을 비교해 보면 Hoog의 값이 전반적으로 약간 큰 값을 나타내는데, 이는 Hoog는 附着이 일어나지 않는 것으

로 가정하였으므로⁶⁾ 본 연구의 결과와 다소 오차가 생긴것으로 생각되어 진다. 즉 Ne gas, He gas 중에는 不純物과 水分이 존재할 수 있다고 볼 수 있으며, 이러한 경우 부착이 일어나게 되면 제 1 전리계수는 실제값보다 작게 나타난다.

이것은

$$\alpha = \alpha^* - \gamma \quad (4-2)$$

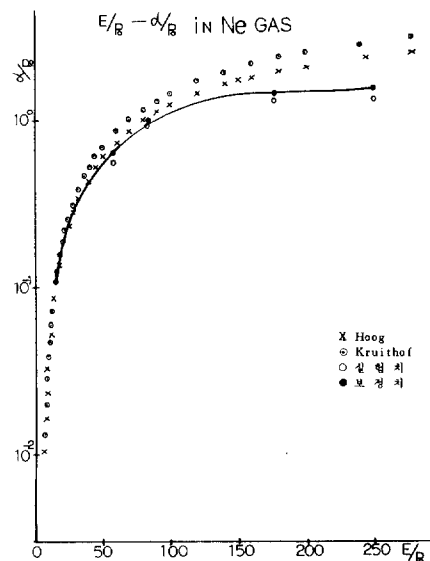


그림 9. Ne gas의 α/P_0 와 E/P_0 의 관계

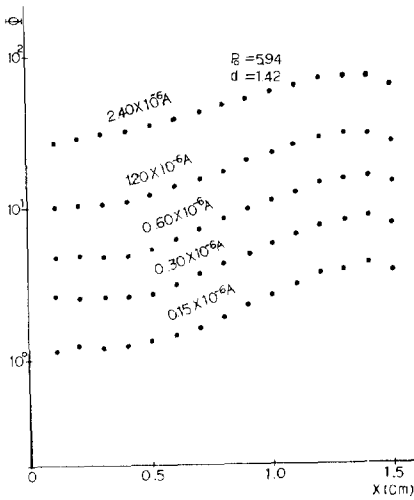


그림 10. 방전전류를 변화시킬때의 $\phi - X$ 관계

α : 실험에 의한 제 1 전리계수, α^* : 부착이 일어나지 않는 경우의 제 1 전리계수, η : 附着係數로서 표현될 수 있으며, 결국 $\alpha < \alpha^*$ 로 됨을 알 수 있다.

4.6 空間電荷效果

그림 10에서 보면 방전전류가 증가하면, 기울기는 작아지는데 방전전류의 증가에 따라 공간전하의 효과가 나타나기 때문이고, 전계의 不均等に 기인된 것이라 생각된다. 그러므로 공간전하의 영향을 없애기 위해서는 음극으로부터 방출된 방전전류를 10^{-7} (A) 이하로 하는 것이 바람직하다.^{6), 8)}

4.7 S/N比의 改善策

S/N比를 改善하는 방법에는 여러가지가 있지만,^{2), 3), 4)} 본 연구에서는 熱雜音電子의 放出確率が 온도에 의존하기 때문에 P·M Tube의 光電面을 냉각시킴에 따라 잡음을 감소시키는 방법을 사용했다. 실제로 -40°C 까지 냉각시키면 열잡음은 현저하게 감소한다. 이것은 열잡음전자에 대응하는 宇宙線 등의 열잡음전자가 주요한 원인이 되었기 때문이다. 따라서 -40°C 정도까지만 P·M Tube의 光전면을 냉각시키고 열잡음전자를 최소로 한다면 S/N比는 대단히 개선된다.

5. 結 論

본 연구에서는 기체의 제 1 전리계수를 광속법으로 측정하고 이값을 補正하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) He gas에 대하여 $15 < E/P_0 < 100$ (V/cm·Torr)의 범위에서는 Haydon, $100 < E/P_0 < 210$ (V/cm·Torr)의 범위에서는 Townsend가 구한 결과와 거의 일치하였다.

2) Ne gas에 대하여는 $10 < E/P_0 < 250$ (V/cm·Torr)의 범위에서 제 1 전리계수를 측정한 결과, 定常 Townsend法으로 측정한 Kruithof의 값과 비교해 볼 때 제 2 전리계수 r 의 영향이 없음을 알 수 있으며, 광속법으로 측정한 Hoog의 값과의 비교에서 附着에 대한 영향이 다소 나타남을 확인하였다.

3) 광량 ϕ 와 전자밀도 n 가 線形的이라는 가정하에 補正值를 구한 값이 다른 연구자들의 결과와 거의 일치함을 보아 본 연구에 적용한 보정방법이 타당하다는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 光束法으로 보다 정확한 제 1 전리계수의 값을 얻을 수 있으며, 금후 空間電荷效果, 불순물에 의한 α 의 변화, Slit幅, 이동거리, 광전자증배관의 雜音 등을 좀더 고려하면 보다 정확한 값이 구해질 것으로 생각된다.

본 연구는 産學協同財團의 學術研究費로 수행된 것임을 附言하며 産學協同財團에 感謝를 드린다.

Reference

- 1) S.J.B. Corrigan and A. Von. Engel; "Excitation and dissociation of hydrogen by an electron swarm" Pro. Roy Soc (London). Vol 245, PP. 335~351 (1958)
- 2) Tekeshi A. Inuma; "Noise of Photomultipliers in the scintillation counting," 應用物理, Vol. 33. (1964).
- 3) 市村勉・稻場文男; "極微弱光の情報検出法の研究" 應用物理, Vol. 39, PP. 913~921 (1970).
- 4) 鹿兒島誠一他; "微弱光の測定" 固體物理 Vol. 6, No. 7, PP. 420~427. (1971).
- 5) 小林喬郎・稻葉文男; "Single Photo-electron Countingによる 微弱光の 検出と その 應用;" 應用物理 Vol. 36, PP. 474~481. (1967).
- 6) C.G.J. Buursen, F.J. De. Hoog and L.H. Van Montfort; "New Values of α/P_0 in pure neon obtained with the luminous-flux method." Physica, Vol. 60, PP. 224~265. (1965).
- 7) J. Dutton, S.C. Haydon and F.L. Jones; Nature, 200. PP. 58 (1963).

- 8) A.K. Bhattacharya; "Measurement of Breakdown Potentials and Townsend ionization coefficients for the Penning mixtures of neon and xenon" Physical Review A. Vol. 13, No. 3, PP.1219~1225. (1975).
- 9) Lorne M. Chanin and G.D. Rork; "Measurements of the first Townsend ionization coefficient in Neon and Hydrogen, Physical Review, Vol. 132, No. 6, PP. 2547~2551. (1963).
- 10) J.M. Meek and J.D. Craggs; "Electrical Breakdown in gases" PP. 223~238 (1978).
- 11) 舊林正平外; 固體の物理, Vol. 6, PP. 420~427, (1971).