

집단 가속된 아르곤 이온의 에너지 측정

박인호 · 최은하*

인천대학교 물리학과, *광운대학교 물리학과
(1995년 11월 10일 접수)

Mesurement of Collectively Accelerated Argon Ion Energy

I. H. Park and E. H. Choi*

Department of Physics, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea
*Department of Physics, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea
(Received November 10, 1995)

요 약 - 본 연구에서는 Marx Generator와 펄스 형성라인을 결합시켜 만든 VEBA(Versatile Electron Beam Accelerator) 장치를 사용하여 아르곤 이온의 에너지를 식각 추적 방법을 써서 측정하였다. 이 장치에서 240 kV, 30 kA, 60 ns의 전자빔이 발생되었다. 이 전자빔이 이극관을 통과하면서 이 때 주입된 아르곤 기체가 이온화되어 아르곤 이온이 얻어진다. 이렇게 형성된 이온은 가상적 음극에 의해 진공 도파관 속으로 가속되고 이를 전자빔과 분리한 후 알루미늄 박막으로 만든 식각 추적판을 때리도록 장치하였다. 이때 아르곤 이온이 뚫고 들어간 알루미늄 박막의 수로부터 이온의 에너지를 구하였다. 이렇게 얻어진 실험값은 이론값과 잘 일치하였다.

Abstract - Using trace etching method in this study, we measure the energy of argon ions generated in VEBA System which is composed of Marx Generator and Pulse Forming Line. In this system the electron beam of 240 kV, 30 kA, 60 ns is generated. Argon ions are formed through the electron beam ionization of a gas cloud injected by a fast puff valve. Thus argon ions are accelerated into vacuum drift tube by a virtual cathode and separated with electron beam, consequently, they heat the trace etching plates made of aluminum thin films. The energy of argon ions are determined by the number of aluminum thin films penetrated by the ions. This experimental value corresponds with the theoretical value.

1. 서 론

강한 전자빔을 진공 중의 중성 가스관 속으로 주입시켜 집단 가속된 이온의 에너지를 측정하는 실험이 1970년에 Graybill과 Uglum에 의해 처음으로 시작되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되었다[1]. 몇년 후 Luce는 Luce-type anode를 이용하여 전자빔이 양극 구멍을 통해 주입될 때 집단 이온 가속이 일어난다는 것을 실험에 의해 설명했다[2]. 한편, 이론에서는 Zucker 등이 이온의 가속은 양극 구멍내의 높은 전장의 기울기에 의해 일어난다고 하였다[3]. 또한 H. S. Uhm은 전자빔의 전류가 한계 전류보다 작을 때에는 집단 가속 현상이 일어나지 않는다는 것을 이론과 함께 이를 실험적으로

증명하였다[4].

본 연구에서는 H. S. Uhm의 1차원 모델을 써서 실험을 분석하였다. 240 kV, 30 kA, 60 ns의 전자빔을 Marx Generator와 펄스 형성라인을 결합시켜 만든 VEBA (Versatile Electron Beam Accelerator) 장치로 발생시켰다. 이온은 전자빔이 Luce-type 이극관을 통과하는 순간에 Fast puff valve로 주입시킨 아르곤 기체를 이온화시킴으로써 얻어진다. 이렇게 형성된 이온은 도파관 속으로 가상적 음극에 의해 가속된 이온을 전자빔과 분리시키기 위해서 영구자석을 사용하였다. 그리고 전자빔과 분리되어 도파관속을 통과하는 아르곤 이온의 에너지를 식각 추적 방법을 써서 계산하였고 이를 이론값과 비교, 분석하였다.

2. 이 론

두 평면 도체 사이를 지나는 전자빔의 가속에 대한 이론[5,6]은 다음과 같은 모형에 의해 설명될 수 있다. 즉, 그림 1과 같이 $z=0$ 와 $z=d$ 인 지점에 각각 접지된 무한 평면 도체판이 있고, 여기에 $J = -J_0 \hat{e}_z$ 의 전류밀도로 전자빔이 $z=0$ 의 도체 평면판을 통해 주입된다. 여기서 \hat{e}_z 는 전자빔이 진행되는 방향 즉 z 축의 단위 벡터이다. 이극판의 음극과 양극의 거리는 L_{CA} 이고 음극의 전위는 $\phi = -V_0$ 이다. 두 평면 도체 사이의 정상상태에 대한 Poisson 방정식은

$$\frac{\partial^2 \phi(z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho(z)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

이다. 여기서 $\phi(z)$ 는 전위이고 ϵ_0 는 자유공간의 투자율이며 전하밀도 $\rho(z)$ 는

$$\rho(z) = \frac{J(z)}{\beta(z)c} \quad (2)$$

로 정의된다. 여기서 $J(z)$ 는 전류밀도, $\beta(z)c$ 는 전자속력을 나타낸다. 이 때의 경계조건은

$$\phi_{z=0} = \phi_{z=d} = 0 \quad (3)$$

이다. 그리고 전자의 질량 인수를 편의상 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma(z) = (1 - \beta^2(z))^{-1/2} = 1 + e [V_0 + \phi(z)] / m_0 c^2 \quad (4)$$

여기서 $\phi_m = -V_0$ 의 가상 음극이 $z=d_m$ 에 형성되는 것을 가정하면

$$\rho(z) = \frac{-pJ_0}{\beta(z)c}, \quad z > d_m$$

$$= \frac{(p-2)J_0}{\beta(z)c}, \quad z < d_m \quad (5)$$

로 표시된다. 이온의 집단가속을 일으키는 전파관에서의 전기장 E_0 는 식 (1)과 (5) 그리고 경계조건 $\phi(z=d_m) = -V_0$ 에 의해서 다음과 같이 나타내어진다.

$$E_0 = \left(\frac{2m_0 c (2-p) J_0}{e \epsilon_0} \right)^{1/2} (\gamma_0^2 - 1)^{1/4} \quad (6)$$

마찬가지로 이극판에서의 전기장 E_{CA} 는

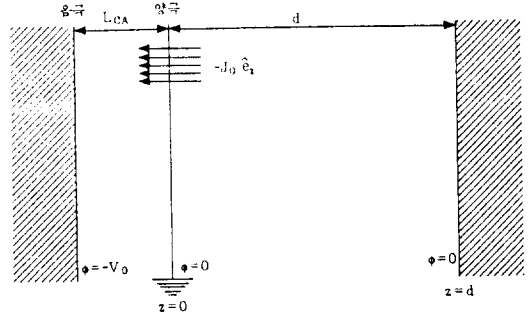


그림 1. 음극과 접지된 평면도체 양극.

$$E_{CA} = \left(\frac{2m_0 c J_0}{e \epsilon_0} \right)^{1/2} (\gamma_0^2 - 1)^{1/4} \quad (7)$$

이다. 식 (6)과 식 (7)을 비교하면

$$E_0 = (2-p)^{1/2} E_{CA} \quad (8)$$

를 얻는다. 여기서 p 는 $p \ll 1$ 이므로 전파관쪽 표면의 전기장 E_0 는 이극판쪽 표면의 전기장 E_{CA} 보다 항상 큰 값을 갖는다. 여기서 $d \gg L_{CA}$ 인 경우

$$p \equiv \frac{L_{CA}^2}{d^2} \approx 0 \quad (9)$$

가 된다. 식 (9)를 식 (6)에 대입하면

$$E_0 = \left(\frac{4m_0 c J_0}{e \epsilon_0} \right)^{1/2} (\gamma_0^2 - 1)^{1/4}, \quad d \gg L_{CA} \quad (10)$$

를 얻게되고 이 전기장 E_0 가 두 평면 사이에서 이온을 가속시킨다. 진공속에서 이온의 집단 가속의 원리는 다음과 같이 설명될 수 있다. 초기에 입사된 전자빔은 양극에서 중성 플라즈마를 형성한다. 계속 주입되는 강한 전자빔은 플라즈마 경계 밖에 최소전위 ϕ_m 을 가지는 가상음극을 형성한다[7]. 이로 인해 플라즈마 표면에 식 (10)에서와 같은 강한 전기장 E_0 가 생겨 양이온이 가상음극쪽으로 가속된다. 이 양이온은 전자빔에 의해 형성된 공간 전하를 중성화시켜 플라즈마 경계면을 팽창시키고, 결과적으로 가상음극과 양이온은 밀착해서 움직이게 된다. 이때 형성되는 이온층의 표면 질량밀도를

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 E_0 M}{Ze} \quad (11)$$

로 한다. 여기서 E_0 는 식 (10)에서 주어지고 Z 는 이온의

전하상태 그리고 M 은 정지질량을 말한다. 만일 이온층의 경계면을 피스톤의 벽면으로, 전자를 피스톤 안의 입자로 보면 이온층의 운동량의 증가는

$$\Delta P = 2\gamma_0 m_0 (v_e - v_i) \quad (12)$$

이다. 여기서 전자의 질량을 말한다. 따라서 경계면의 전자속 $n_e(v_e - v_i)$ 과 식 (12)를 이용하면 다음과 같은 운동 방정식을 얻는다.

$$\frac{d(\sigma v_i)}{dt} = 2\gamma_0 m_0 n_e (v_e - v_i)^2. \quad (13)$$

여기서 n_e 는 플라즈마 표면에서의 전자밀도이다. 초기 조건 $v_i(t=t_0)=0$ 를 사용하고 식 (10)과 식 (11)을 식 (13)에 넣어 적분하면

$$v_i(t) = v_e \left\{ 1 - [1 + z(t - t_0) \frac{\gamma_0 m_0}{M} \left(\frac{eJ_0}{m_0 c \epsilon_0} \right)^{1/2} (\gamma_0^2 - 1)^{-1/4}]^{-1} \right\} \quad (14)$$

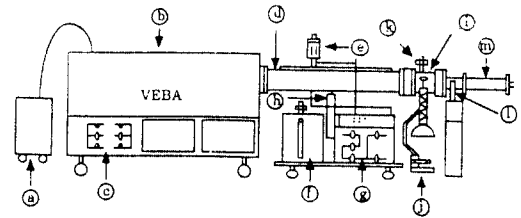
가 얻어진다. 여기서 $J_0 = en_e v_e$ 이다. 만일 $v_i(t) \ll c$ 이면 이온의 평균 운동에너지는

$$E_k = \frac{1}{2} M v_i^2(t) \quad (15)$$

이다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구를 위해서 사용한 Marx 고전압 펄스 발생장치의 약도는 그림 2와 같다. Marx Generator는 $100 \times 84 \times 244 \text{ cm}^3$ 의 통속에 $0.2 \mu\text{F}$ 의 콘덴서 12가 병렬로 연결되어 있다. 아래 그림 3에서 보는 바와 같이 $\pm 50 \text{ kV}$ 의 전원을 써서 $1 \text{ M}\Omega$ 과 $60 \text{ K}\Omega$ 의 저항을 통해 콘덴서를 충전시키고 첫번째 불꽃 방전 스위치를 트리거시킬 때 전체 불꽃 방전 스위치가 거의 동시에 켜짐으로서 12개의 축전기가 직렬로 연결되면서 12배의 전압을 얻게 된다. 만약 20 kV 의 입력 전압을 사용하게 되면 Marx Generator에 축적되는 총에너지는 480 J 이 된다. 펄스 형성라인은 2개의 원통형 도체로 되어 있으며 왼쪽에는 Marx Generator에 오른쪽에는 다이오드에 각각 연결되어 있다. 두 원통형 도체 사이는 작동하기 전에 증류수로 채울 수 있도록 되어 있으며, 축 중심부에는 황동전극의 불꽃방전 스위치가 있어 Marx Generator에서 나온 출력으로 펄스 형성라인을 충전시켜 빠른 펄스를 얻게



Ⓐ: 전원장치 Ⓑ: Marx 뱅크 Ⓒ: 절연유 순환기 Ⓓ: 펄스 형성라인
Ⓔ: 수면계 Ⓕ: 물탱크 Ⓖ: 물 순환기 Ⓗ: 이온 교환수지
Ⓛ: 이극관 Ⓜ: 진공펌프 Ⓟ: 게스 주입 밸브 Ⓡ: 자석 Ⓢ: 이온 전파관

그림 2. Marx 고전압 펄스 발생장치의 개략도.

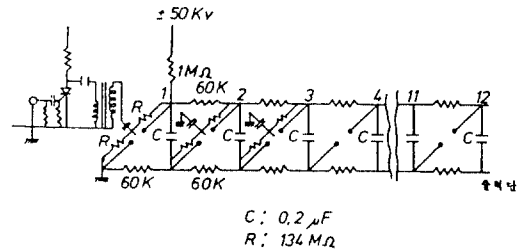


그림 3. Marx Generator 배선도.
C: $0.2 \mu\text{F}$
R: $134 \text{ M}\Omega$

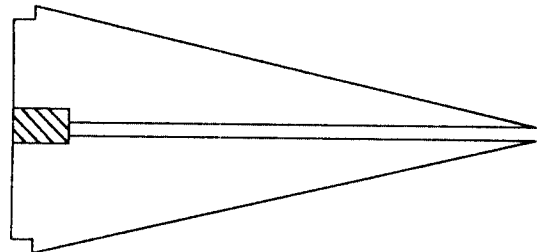


그림 4. 음극.

된다. 선형 이극관은 루사이트 판으로 절연되어 펄스 형성라인에 연결되어 있다. 그림 4에서와 같이 이극관 안에는 전극으로 8.5 cm 직경의 원추형 알루미늄 통이 음극축이 되어 그 끝에 4 mm 인 텅스텐 음극이 삽입되어 있다. 양극은 9.22 cm 인 스테인레스 판으로 그림 5와 같은 모양으로 되어 있고 중앙의 구멍은 직경이 2 cm 이며 이것이 이극관의 중앙에 삽입되어 있다. 음극과 양극 사이에는 이극관의 밖에 장치되어 있는 Fast puff valve의 통로 끝이 들어와 있어서 여기로 주입된 기체가 전자살에 의해 이온화되어 플라즈마를 형성하고, 이들이 계속 주입되는 전자빔에 의해 가속되도록 이극관은 다시 10 cm 직경의 전파관으로 연결되며 이 장치의 구조

는 그림 6에 나타나 있다.

계단식 접의 알루미늄 박막은 그림 7과 같이 $5.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ 의 알루미늄판에 LR 115 Type II KODAKE Film을 올려 놓고 그 위에 두께 0.008 mm 인 얇은 알루미늄 박막 호일을 폭이 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 cm, 되게 잘라 2 mm의 간격으로 1장, 2장, 3장, 4장, 5장씩 겹쳐서 테이프로 고정시킨다. 이렇게 만든 식각추적판을 그림 6에서 보는 바와 같이 장치했다. 양극으로부터 식각추적판까지의 거리는 23 cm이다. 알루미늄의 두께는 이온의 에너지를 계산하는데 중요하기 때문에 보다 정확히 측정하기 위해서 다음과 같이 하였다. 즉, 알루미늄 박막을 $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 되게 만들어 이것의 질량을 전자천칭으로 측정한 후 알루미늄의 밀도 $\rho = 2.6989/\text{cm}^3$ 를

이용하여 두께를 여러번 측정하여 평균값을 이용하였다. 측정 및 계산 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 알루미늄 박막 1장의 평균두께 $d = 0.008 \text{ mm}$ 이다. 또한 식각추적판을 그림 6에서와 같이 검출기의 구리망에 장치하여 검출기에 나타나는 신호를 볼 수 있도록 동축 케이블로 오실로스코프에 연결하였다.

먼저 이극관과 이온 전파관을 $2.0 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 로 진공시킨 후, 펄스 발생기를 $450 \mu\text{s}$ 의 시간 지연을 시켜 놓고 Fast puff valve의 전원을 300 V로 충전시킨 후, Marx Generator로 축전기당 각각 20 kV로 충전시켜 펄스를 발생시키면 Fast puff valve가 열린 후 $450 \mu\text{s}$ 의 시간이 지나서 전자살이 발생된다. 이와 같이 주입된 아르곤 기체는 발생된 전자빔에 의해 이온화되고 이렇게 생성된 이온은 이온 전파관 속으로 가상음극에 의해 가속된다. 이온 전파관 속을 지나가는 전자빔은 자석에 의해

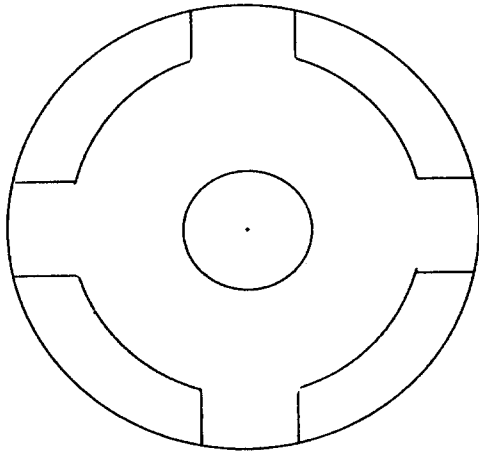
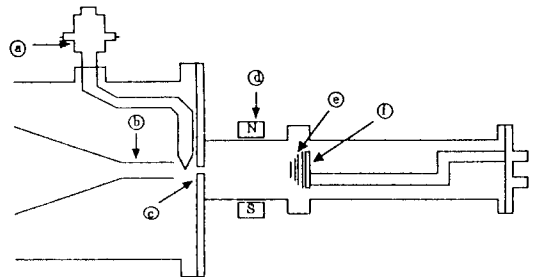
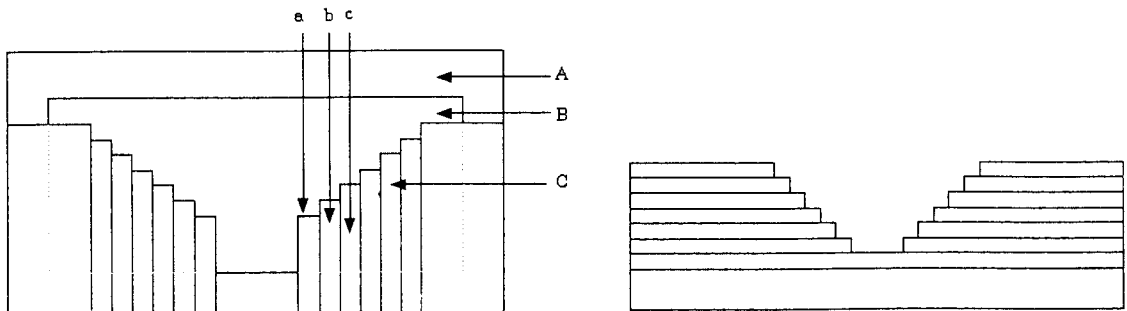


그림 5. 양극.



- (a) : 가스 주입 밸브
- (b) : 노즐
- (c) : 양극
- (d) : 자석
- (e) : 검출기
- (f) : 식각추적판

그림 6. 이극관과 이온 전파관의 개략도.



- A: $5.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ 알루미늄판
- B: LR 115 Type II KODAKE Film
- C: 계단식 접의 알루미늄 박막

그림 7. 계단식 접의 알루미늄 박막.

표 1. 알루미늄의 질량과 두께 측정 결과

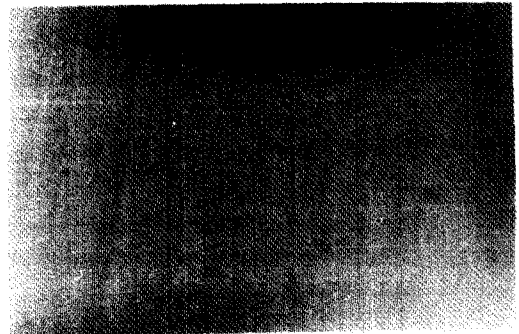
| 회수 구분 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| m(g) | 0.00216 | 0.00214 | 0.00216 | 0.00216 | 0.00214 | 0.00218 | 0.00215 | 0.00217 | 0.00216 | 0.00216 |
| d(cm) | 0.00080 | 0.00079 | 0.00080 | 0.00080 | 0.00079 | 0.00081 | 0.00080 | 0.00080 | 0.00080 | 0.00080 |

분리되고 이온만이 식각추적판에 도달되어 식각 자국을 남기고 동시에 일부는 검출기에 검출되어 오실로스코프에 이온 펄스를 나타낸다.

한번 노출된 식각추적판은 꺼내서 알루미늄판은 1장씩 슬라이드판에 고정시키고, 알루미늄 박막 밑의 LR 115 Type II KODAKE Film은 2.5 N 60℃의 NaOH 용액에 약 60분 동안 담가 두었다가 물에 씻어서 말린 후 슬라이드판에 고정시킨다. 이렇게 준비된 알루미늄 박막은 현미경 UNITRON B_i-12869를 사용하여 400배의 배율로 표면을 찍는다. 또한 LR 115 Type II KODAKE Film은 현미경 OLYMPUS-22746을 사용하여 400배의 배율로 찍는다. 이때 그림 7의 a, b, c 각 부분을 나누어 찍음으로써 가속된 아르곤 이온이 뚫고 들어간 알루미늄의 박막 수를 측정할 수 있다. 즉, a의 부분에 식각된 자국이 나타난 경우, 이는 알루미늄 박막 1장을 뚫은 것이 분명하고 b 부분에서도 식각된 자국을 볼 수 있다면 이는 2장의 알루미늄 박막을 뚫은 것이다. 이러한 방법으로 c부분에서의 식각된 자국을 관찰하여 식각된 자국이 보이지 않았다면 이 실험에서 아르곤 이온이 뚫고 들어간 알루미늄의 박막 수는 2장으로 결정한다.

4. 결과 및 분석

본 실험에서 아르곤 이온의 에너지를 측정하기 위해 이온 전과관의 진공도를 2.0×10^{-4} Torr로 하였고, Fast puff valve를 써서 진공속으로 아르곤 기체를 주입시킨 후, 450 μs 지나서 0.24 MeV 30 kA 60 ns의 강한 전자빔을 발생시켜 아르곤 기체를 이온화시켰다. 이렇게 생성된 이온은 이온 전과관 속으로 가상음극에 의해 가속되어 양극으로부터 23 cm되는 지점에 장치된 알루미늄 박막을 뚫고 그 밑의 식각 추적판에 식각된 자국을 나타낸다. 사진 1(a)은 이 실험에 사용된 알루미늄 박막의 노출되지 않은 자연상태의 표면을 현미경 UNITRON B_i-12869를 사용하여 400배의 배율로 찍은 것으로 어떤 식각자국도 나타나 있지 않다. 사진 1(b)는 방전시 노출



(a)



(b)

사진 1. (a) 알루미늄 박막의 자연상태 표면(UNITRON : × 400), (b) 방전시 노출로 알루미늄 표면에 식각된 자국(UNITRON : × 400).

된 알루미늄 박막의 표면을 사진 1(a)과 마찬가지로 400배의 배율로 놓고 찍은 것으로 집단 가속된 아르곤 이온이 뚫고 들어갈 때 식각된 자국을 관찰할 수 있다. 사진 2(a)은 계단식 겹의 알루미늄 박막을 뚫고 들어가 LR 115 Type II KODAKE Film에 식각된 자국을 2.5 N 60℃의 NaOH 용액에 약 60분 동안 담근 후 맑은 물에 씻어 말린 것을 현미경 OLYMPUS-22746을 사용하여 400배의 배율로 경계면 그림 7의 a 부분을 찍은 것이다. 사진 2(b)는 사진 2(a)과 마찬가지로 400배의 배율로 하여 그림 7의 b 부분을 찍은 것이다. 앞의 사진에서 볼 수 있듯이 사진 2(a)에서는 아르곤 이온에 의해 식각된

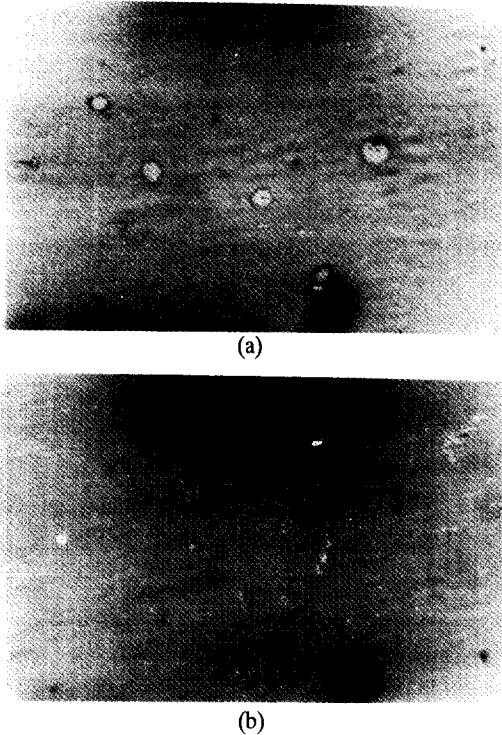


사진 2. (a) LR 115 Type II KODAKE Film에 식각된 자국(OLYMPUS : $\times 400$), (b) LR 115 Type II KODAKE Film에 식각된 자국(OLYMPUS : $\times 400$).

자국이 나타나 있다. 반면에 사진 2(b)에서는 식각된 자국이 거의 나타나 있지 않다. 따라서 가속된 아르곤 이온이 뚫고 들어간 알루미늄 박막의 수는 1장 또는 2장이라고 말할 수 있다. 그런데 이 실험에서 사용된 알루미늄 박막 1장의 두께 $d=0.008$ mm이므로 아르곤 이온이 뚫고 들어간 거리는 l 은 0.008 mm $< l < 0.016$ mm이다. 이 두께를 가지고 아르곤 이온의 에너지를 계산하기 위해서 The Range and Stopping Power Tables of L. C. Cliffe and Schilling[8]을 이용했다. 진공도 2.0×10^{-4} Torr에서 0.24 MeV 30 kA 60 ns의 강한 전자빔을 발생시켜 아르곤 이온을 가속시켰을 때 알루미늄 박막을 뚫고 들어간 길이가 0.0016 mm이므로 알루미늄에 대한 Ar 이온의 Range Energy는 알루미늄 밀도(2698.9 mg/cm 3) \times (0.0008~0.0016 cm) = (2.159~4.318) mg/cm 2 이다. 이것으로부터 "Range and Stopping Power Table for Heavy Ions"에서 비례배분법으로 Ar 이온의 에너지를 구하면 이 값은(0.6291~1.5977) Mev/u를 얻는다. 이것과 이론식으로부터 얻어진 아르곤 이온의 에너지를 비교하

기 위해서 식 (15)를 이용하여 계산하면 그 값은 1.5083 Mev/u가 되어 실험값이 이론값과 같은 범위내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 실험에서 얻어진 결과를 종합하여 보면 진공도 2.0×10^{-4} Torr에서 0.24 Mev 30 kA 60 ns의 강한 전자빔을 이용하여 Fast puff valve에 주입된 아르곤 기체를 이온화시키고 이 이온이 가속되어 노출된 계단식 알루미늄 박막을 1장 내지 2장을 뚫고 들어갔다. 이것에 의해 구해진 아르곤 이온의 에너지는 $0.6291 \leq \frac{40}{18} Ar$ 이온의 에너지(Mev/u) ≤ 1.5977 이므로 위의 실험값은 이론값과 잘 일치한다.

본 실험에서는 0.008 mm의 쿠킹 호일을 사용하여 에너지를 측정된 결과 에너지 범위가 너무 크게 나왔으나 루사이트 판과 같은 것을 사용하면 보다 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다. 그리고 로고우스키 코일을 이용하여 비행거리 및 시간을 측정하여 이온의 에너지를 측정하는 방법도 시도하므로써 식각 추적 방법의 결과와 비교하여 볼 수 있을 것이다. 또한 더 큰 질량을 갖는 기체를 이용하고, 전자의 에너지를 높인다면 이온의 에너지도 더 높일 수 있을 것이다. 앞으로 이 방면의 연구도 계속 진행하고자 한다.

참고문헌

1. S. Graybill and J. R. Uglum, J. Appl. Phys. **41**, 236 (1970).
2. J. S. Luce, H. L. Sahlin and T. R. Crites, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-20**, 336 (1973).
3. O. Jucker, J. Wyatt, M. Satlin, J. S. Luce and B. Freeman, Proc. 2nd Int. Topical Conf. On Collective Methods of Acceleration (Laguna Beach, Calif., 1978).
4. W. W. Destler, H. S. Uhm, H. Kim and M. P. Reiser, J. Appl. Phys. **50**, 3015 (1979).
5. J. W. Poukey and N. Roaster, Plasma Phys. **13**, 897 (1971).
6. C. L. Olson, Phys. Fluids **18**, 585 (1975).
7. D. H. Choi, H. M. Shin, H. K. Bak, J. J. Koh, E. H. Choi and D. I. Choi, New Physics **27**, 134 (1987).
8. L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, Nuclear Data Tables **7A**, 233-463 (1970).