

액체 금속 이온원의 빔 안정도 향상

현정우 · 임연찬 · 김성수 · 오현주* · 박철우** · 이종항** · 최은하 · 서윤호 · 강승언†

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

*서울산업대학교 기계공학과, 서울 139-743

**한국산업기술대학교 기계공학과, 경기도 429-793

(논문접수일 : 2004년 7월 1일)

Beam stability improvement of liquid metal ion source

J. W. Hyun, Youn Chan Yim, Seuong Soo Kim, Hyun Joo Oh*, Cheol Woo Park**, Jong Hang Lee**,
Eun Ha Choi, Yunho Seo, Seung Oun Kang†

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

**Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743*

***Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University, Gyeonggi-do 429-793*

(Received July 1, 2004)

요 약

이전의 연구에서의 소스 형태는 전기화학적 방법으로 에칭된 텅스텐 선에 코일형태의 히터를 부착한 것으로 액체금속을 직접 가열하는 방법이었다. 이전의 모델에서는 액체금속을 가열하는 과정에서 코일형태의 히터에 대한 과도한 전력소모가 발생함으로써 본 연구에서는 코일형태의 히터를 대체할 수 있는 새로운 방법을 제시하고 그의 특성을 연구하였다. Pre-etching된 250 μm 의 텅스텐 선을 7 mm 단위로 절단, 이를 갈륨저장소로 만든 형태이다. 가열방식은 직접방식으로 갈륨을 저장소에 적재(loading)하는 과정과 빔의 안정도가 이전의 방법보다 더욱 향상되었음을 본 연구의 결과를 통해 볼 수 있다.

주제어 : 전기화학적 방법, 갈륨저장소, 로딩, 빔의 안정도

Abstract

Previous studies on the liquid Gallium ion sources used an electro-chemically etched tungsten wire with a coil-type heater. Such a structure requires excessive power consumption in the course of heating the liquid metal. In this work, a new structure is proposed that replaces the coil-type heater. It uses a Gallium reservoir made of six pre-etched 250 μm tungsten wires that surround the needle electrode. Gallium loading at the reservoir is observed to be much more stable, resulting in an improved beam stability.

Key Words : Electro-Chemical Etching, Gallium Reservoir, Loading, Beam Stability

1. 서 론

80년대 중반부터 집속이온빔(Focused Ion Beam)장치가 개발되어 현재 여러 가지 기초 및 응용분야에 사용되고 있다 [1-2]. 여기에 사용되는 이온원(Ion Source)은 고전류 밀도, 고선명도(High Brightness) [3], 낮은 에너지 퍼짐 [4] 등의 특성을 지니고 있는데 이때 사용되는 이온원의 종류로는 Ga, In, Au, Be, Si, Pd, Al, Ni 등의 액체금속이온원(Liquid Metal Ion Source)이 연구되고 있다. 이전의 많은 학자들을 통한 다양한 액체금속이온원들에 대한 연구가 있었기에 오늘날에 있어서는 액체금속이온원의 특성에 관한 연구보다는 LMIS의 구조적인 연구 및 빔의 안정도, 전류-전압특성 등과 같은 분야에 대한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. FIB 시스템에 가장 적당한 액체금속중의 하나가 갈륨으로서 본 연구에서는 갈륨액체금속이온원에 대해 새로운 구조를 개발하여 전류-전압 특성 및 빔의 안정도에 대한 연구를 하였다. 또한 LMIS의 구조적 특성상 바늘전극과 이를 둘러싼 액체갈륨의 저장소의 직경은 거의 $1000\mu\text{m}$ 이며 고진공 내에서 실험이 이루어지기에 직접적인 LMIS내부의 온도 분포에 대한 측정은 실험실 사정상 이루어질 수 없었다. 갈륨액체금속이온원(Ga LMIS)의 형태는 주로 바늘형(needle type)과 모세관형(capillary type)이 있는데 모세관형태의 이온원은 낮은 전류에서는 잘 작동하지 않을 뿐만 아니라 액체 콘(liquid cone)도 방출전류량이 $\sim 10\mu\text{A}$ 이하에서는 지속되지 않으며 노즐(nozzle) 끝에서의 액체 콘이 커서 방출전류의 불안정을 이끌기도 한다. 이러한 문제해결은 바늘형태의 이온원 방식을 택함으로 인해 해결할 수 있다. 이는 콘의 크기가 상대적으로 모세관 형태보다 작으며, 계속적으로 바늘의 정점(apex)에 콘이 형성되어 이온방출을 원활하게 하기에 전류의 안정성을 높일 수 있다. 기존의 직접가열방식(directly heated sources)의 이온원들을 볼 때 프랑스의 Sudrud 그룹과 Oregon Graduate Center의 Swanson 그룹이 개발한 머리핀(hairpin)형태와 Hughes Research Lab.에서 개발한 리본히터(ribbon heater source)형태가 주로 이용된다. 머리핀형태는 아래의 그림(1.c)과 같이 바늘전극이 필라멘트와 spot-welding되어 있으며, 그림(1.d)는 리본히터 형태로서

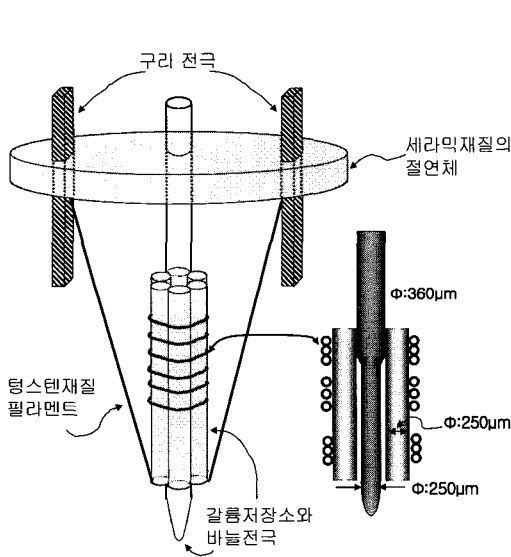
팁 끝으로 액체금속을 원활하게 이동시켜 주기 때문에 머리핀형태의 이온원보다 훨씬 개선된 전류 안정도를 얻을 수 있다. 간접가열방식(indirectly heated sources)의 경우 그림(1.e)와 같이 UKAEA Culham Lab.에서 개발한 Culham Source가 있다. 간접가열방식의 경우 다양한 형태가 사용되는데 직접가열방식보다 훨씬 긴 동작수명을 지닌다. 본 연구실에서는 직접가열방식으로 기존방식은 그림(1.b)와 같이 코일필라멘트 내부에 갈륨액체금속을 적재한 경우이며, 새로운 형태는 그림(1.a)와 같이 액체갈륨을 적재하여 이루어진 것이다 [8,9]. 액체금속이온원의 이온방출 형태의 관측결과 [5]로부터 전형적인 바늘전극의 반경은 $\sim 20\mu\text{m}$ 정도이고, 이에 대한 전기장은 $\sim 10^8\text{ V/m}$ 이다. 이러한 높은 전기장에 의해 액체막이 변형되어 전기응력과 표면장력이 평형을 이루게 되고 Taylor cone이 형성된다. 분석된 콘모델에 대한 전기장의 해를 사용하여 이온형성의 구조와 이온방출 영역 등의 크기에 대한 해석적 연구의 결과에 의하면 전기장 기화에 의한 이온방출의 경우 초기의 점화전압에서는 액체금속막이 콘각 49.29° 의 Taylor 콘과 유사한 형태로부터 돌기된 수 \AA 의 콘 표면에서 이온이 방출되며, 전압의 증가로 $\sim 10\mu\text{A}$ 의 전류일 때는 강한 전기장에 의하여 돌기 콘이 인장되면서 침정형이 되어 $30^\circ\sim 20^\circ$ 정도의 각을 갖는 수 10 \AA 크기의 콘으로부터 $\sim 20\text{ \AA}$ 이내의 영역에서 이온이 방출된다[6]. 또한 전기장이온화에 의한 전류는 $0.1\mu\text{A}$ 이하로 고전류 영역일수록 전기장 기화에 비하여 작은 비율을 갖는다. 이와 같은 결과는 Taylor 콘의 끝에 형성된 침정형 돌기로부터 콘 모델을 가정한 것이다. B. Willkens와 T. Venkatesan [7]의 경우에서도 에너지 결손이 서로 차이가 날 때, 특히 고전류 영역에서의 방출각(emission angle)에 따른 상대적인 세기의 관계를 통해 Taylor 콘의 끝에 침정형 돌기의 형성이 가능하다는 결과를 얻었다. 본 연구에서는 이와 같은 모델을 이론적 모델로 택하고서 직접 제작한 액체갈륨이온원에 대해 홈(groove)의 형성과 관련된 액체금속의 흐름저항에 따른 변화에 대한 관측으로 코일형태의 액체금속저장소 구조와 홈이 형성된 새로운 구조의 액체금속저장소를 지닌 LMIS의 전류-전압 곡선과 빔의 안정도를 측정하였다.

2. 실험방법

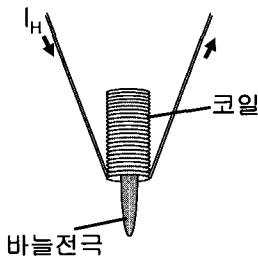
코일을 액체금속저장소로 이용한 이전형태의 액체금속이온원의 경우, 코일에는 홈(groove)이 형성되지 않은 형태이지만 새로운 형태의 액체갈륨저장소는 6개의 텅스텐 축(rod)으로서 표면에 홈을 형성시켰다. 코일형 액체금속저장소를 사용하는 경우와 홈(groove)이 있는 액체금속저장소의 두 경우에 대해서 전류-전압특성 곡선과 빔의 안정도를 측정, 비교를 할 것이다.

다음은 바늘전극 및 액체금속저장소를 제작하는 과정으로서 저장소는 pre-etching과정만으로 제작이 이루어진다. 바늘전극은 직경이 360 μm 의 텅스텐

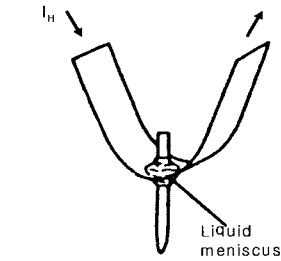
선을 전기화학적 방법을 사용하여 Taylor 콘을 갖는 바늘을 pre-etching, pointing, blunting의 3단계 과정을 거쳐서 제작하였다. 전해질 용액으로는 CuSO_4 와 KOH 를 1000 ml의 물에 각각 0.25 g, 640 g을 넣어 만든 용액을 사용하였으며 갈륨 저장소의 제작은 pre-etching한 텅스텐 선을 가지고 제작하였고 그림 1.a에 나타내었다. Pre-etching의 단계에서는 텅스텐 선의 표면에 홈(groove)을 만들기 위함과 선의 굵기를 조절하기 위한 과정이다. 홈의 거칠기는 낮은 전압을 공급하면 텅스텐 선의 표면이 거칠어지고, 높은 전압을 가하면 텅스텐 선의 표면이 매끄러워진다. 홈은 액체금속(액체갈륨)의 바늘표면에 대한 흐름저항에 관계하는 요소로서, 홈이 매끄러울 경우



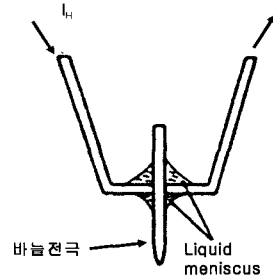
(a) 표면에 홈(groove)이 형성된 텅스텐 축을 액체갈륨 저장소로 이용한 새로운 형태



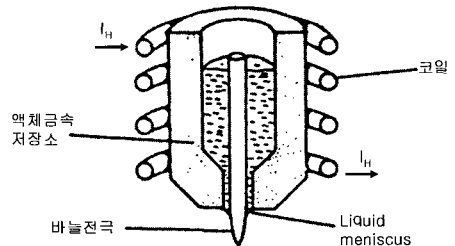
(b) 액체금속저장소로 코일을 사용한 형태



(c) 머리핀 형태 (hairpin type)



(d) 리본형태 (Hughes type)



(e) 간접가열방식 (Culham type)

그림 1.

흐름저항은 커진다. 흐름저항이 작을수록 I-V 특성 곡선의 기울기가 급격하게 나타나고 너무 작으면 액체줄기가 제대로 형성되지 않아 빔의 안정도가 매우 떨어지게 된다.

Pointing은 blunting의 전단계로 텅스텐 선의 끝부분을 예리하게 etching한다. 그리고 blunting은 Taylor 콘 형성에 적합하도록 곡률반경 형태를 조절하는 과정이다. 바늘 정점의 점근선이 약 40° 정도 이어야 하며 이로서 Taylor 콘의 반각 49.29° 보다 약간 작은 값으로 돌기 형성에 적합하게 된다. 제작된 바늘전극을 그림 1.a와 같이 세라믹 접착체를 이용하여 고정시켜 이온원을 제작하였다. 제작된 이온원을 이용한 액체갈륨의 적재(loading)과정은 그림 1.b와 같으며 액체갈륨의 산화 현상을 최소화하기 위해 $\sim 10^6$ Torr의 진공도가 유지되는 진공 챔버 내에서 이루어진다. 고체 갈륨을 담은 용기에 ~ 1 A의 heating current를 공급하여 용융시킨 후, 이온원에 1.5 V ~ 1.9 V의 전력을 공급하여 이온원의 전극과 갈륨저장소를 가열시키고 가열전류를 낮추면서 액체갈륨의 온도를 서서히 낮추게 되면, 액체갈륨과 이온원 전극의 온도가 동일한 시점에서 모세관현상에 의해 갈륨저장소 내로 액체갈륨은 흘러 들어가게 된다. 이 때 이온원의 바늘전극 전체에 열이 고루 잘 퍼져야 갈륨저장소 끝까지 액체갈륨의 적재가 이루어진다. 공급된 전기장과 액체금속의 분

자간의 인력이 바늘전극 정점(apex)에서 평형상태를 이룸과 동시에, 빔 방출로 인해 테일러 콘각에서의 액체갈륨의 이온화 발생으로 인한 바늘전극 정점부근에서의 빈 공간 형성은 액체금속의 표면에 존재하는 분자들의 흐름을 유도하게 된다. 그런데 코일 형태는 이러한 원통형 코일의 원통 표면에 존재하는 분자들의 흐름저항(flow impedance)을 방해하는 구조이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 바늘 전극의 etching된 아래 부분과 etching이 되지 않은 윗부분과의 텅스텐 선의 굵기의 차에 의해 형성된 빈 공간을 갈륨 저장소로 이용하였고 저장소로 사용되는 텅스텐 선의 홈들이 평행한 방향으로 형성되어 있다. 따라서 이전의 형태보다 액체 갈륨의 흐름이 원활하여 갈륨 공급이 일정하고 안정적이어서 빔의 안정적인 방출에 기여할 것으로 예측된다. 코일형태는 새로운 형태와 비교할 때 (가열전류를 공급해 주는 회로구성 부분에서) 텅스텐의 선저항 값이 높을 것임을 예측할 수 있다. 이에 대한 측정된 선저항값은 코일형태는 0.428 Ω, 새로운 형태는 0.227Ω으로 일본 YOKOGAWA Electric works사에서 제작된 아날로그 방식의 wheatstone bridge로 측정하였다. 즉 이 선저항값을 통해 액체갈륨에 공급되어지는 가열전류값이 이전 형태보다 새로운 형태의 경우가 높아져야 함을 예측할 수 있다.

일반적인 전류-전압 특성 곡선에 있어서 $dI/dV \approx 15 \mu A/kV$ 또는 $20 \mu A/kV$ 로 알려져 있다. 전류-전압의 기울기는 에미터(바늘전극, emitter)의 기하학적인 구조, 사용되는 액체금속, 공급되는 온도에 따라 변하며, 점화전압 V_g 의 경우는 에미터의 모양과 크기와 같은 기하학적인 구조에 의해 50V ~ 10kV까지 변화한다고 한다. Wagner의 연구결과를 보면 바늘전극(에미터)의 곡률반경과 표면의 거칠기에 따른 dI/dV 의 증가를 실험하였는데 방출되는 전류 I 는

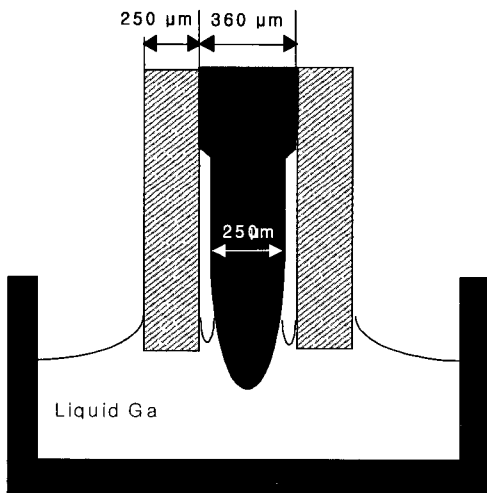


그림 2. 액체갈륨의 저장소 내로의 적재(loading) 과정

$$I = \frac{1.6 \times 10^{12} \rho}{M\eta G} \frac{T^3 R_n}{L} \left[\frac{\epsilon_0 E_s^2}{2} - \frac{2\gamma k E_s}{V} \right] \text{ ----- Eq 1)}$$

이다. 여기에서 ρ 는 액체금속의 밀도, 분자량 M , 액체금속의 점성 η , 에미터(바늘전극) 표면에 형성된 홈(groove)를 포함한 표면의 거칠기 T , 바늘전극의 반경 R_n , 에미터의 길이 L , 방출되는 빔의 중성원자에 대한 이온들의 비에 관련된 파라미터 G , 액체금속의 이온화

를 위해 필요한 전기장 E , 액체의 표면장력 γ , 에미터의 기하학적인 구조에 관련된 상수 k 이다. Wagner는 위의 식을 통해 dI/dV 는 반경과 거칠기에 직접적으로 관련되는 량으로서 이러한 사실은 ‘흐름저항(flow impedance)의 감소는 dI/dV 의 증가’로 해석하였다 [10,11].

제작된 갈륨 액체금속이온원을 진공 장치에 넣고 고전압과 heating current를 주면서 방출되는 이온의 전류를 Faraday cup으로 측정한다. 진공도는 이온원의 종류에 따라 약간의 조정이 필요하다. 예를 들면 갈륨은 산화가 잘 일어나므로 $\sim 10^5$ Torr 이하의 고진공에서 사용되어야 한다. 일반적으로 빔의 안정성을 위해서는 $\sim 10^8$ Torr 이하의 진공도가 필요하지만 본 실험에서는 $\sim 10^6$ Torr 로 유지된 상태에서 전류-전압 특성 곡선과 빔의 안정도를 측정하였다. 전류-전압 특성 곡선 측정과 빔의 안정도 측정은 이온원의 제작 후 반드시 거쳐야하는 기본적인 실험이다. 본 연구에서의 이전형태와 새로운 형태의 액체금속이온원에 대한 전류-전압 특성 실험은 진공챔버의 진공을 $\sim 10^6$ Torr대로 유지하면서 이루어졌다. 빔의 최초 방출이 이루어질 때는 상당한 동요가 존재하기에 1800 sec 이상 안정된 상황을 유지할 수 있도록 가열전류 및 가속전압 등을 조절하여 안정된 상태에 도달한 것을 확인한 후 측정을 하였다. 빔의 안정도 측정 실험 또한 $\sim 10^6$ Torr의 진공을 유지하면서 4000 sec 동안 측정하였다. 본 연구에서는 흐름저항에 관한 Wagner의 이론을 바탕으로 텅스텐 바늘전극과 갈륨 저장소의 표면에 홈(groove)를 형성한 새로운 형태의 LMIS와 홈을 형성하지 않는 코일형태의 LMIS에 대해 전류-전압 특성과 방출빔의 안정도를 측정하였다.

3. 실험결과

본 연구에서는 개발, 제작한 새로운 형태의 갈륨 액체금속이온원에 대한 전류-전압 특성곡선 측정과 빔의 안정도를 측정하였다. 기존의 모델은 홈(groove)이 형성되어 있지 않은 코일형태의 액체갈륨 저장소를 지닌 형태이며, 홈이 액체금속의 흐름 방향에 평행한 구조를 갖는 새로운 구조의 액체금속 이온원에 대한 연구로서 이전의 구조와 새로운 구조에 대한 전류-전압 특성 곡선과 빔의 안정도에

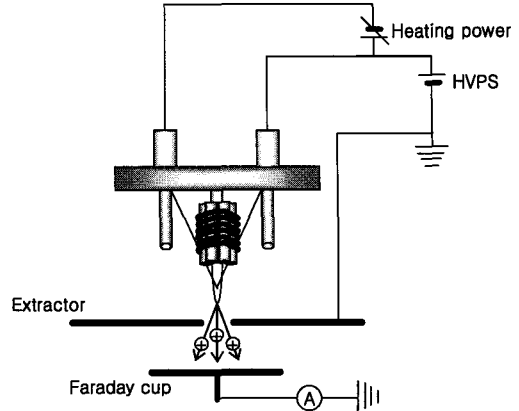


그림 3. 빔의 안정도와 전류-전압특성을 측정하기 위한 회로의 개략도

대한 측정을 하였다. 구조적인 차이로 인한 선저항 값의 차이(코일형태는 0.428 Ω , 새로운 구조는 0.227 Ω)로 인해 공급되는 가열전류의 값이 코일형태는 1.7 A, 새로운 구조는 2.0 A인 상황에서 빔의 방출조건을 잡았으며 1800 sec 이상의 안정된 상태를 유지한 후에 전류-전압특성 및 빔의 안정도를 측정하였다. 이때의 진공 챔버의 진공도는 $\sim 10^6$ Torr를 유지하였다.

그림 3은 전류-전압 특성곡선 및 안정도 측정을 위한 시스템의 개략도이다. 이 시스템을 사용하여 전류-전압 특성 곡선을 측정하였다. 그림 4는 액체갈륨 이온원의 전류-전압 특성곡선을 보여준다. 특성을 보면 전압에 대한 전류의 선형적인 증가를 잘 볼 수 있다. 이온원에 공급하는 전압을 6.0 kV 에서

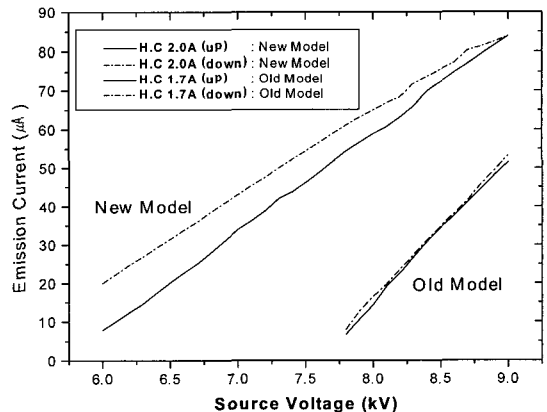


그림 4. 전류-전압 특성 곡선

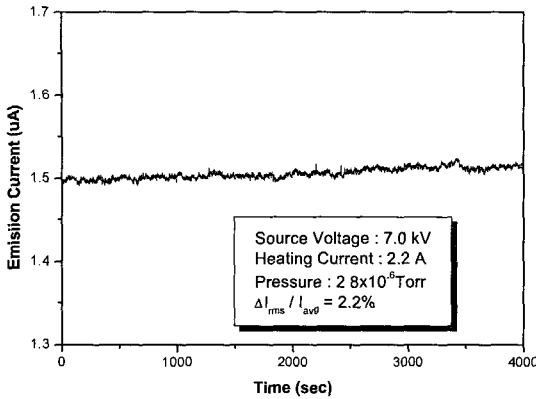


그림 5. 새로운 형태의 갈륨저장소를 지닌 갈륨 액체금속이온원의 방출빔의 안정도

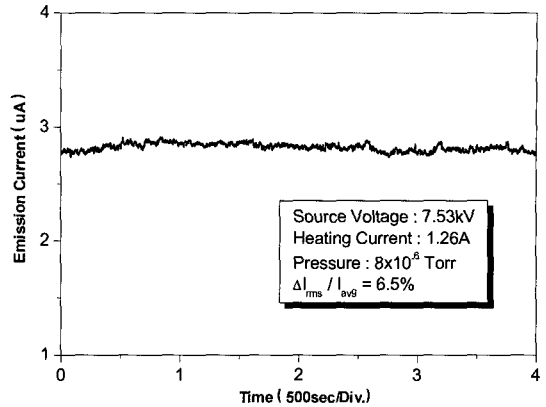


그림 6. 코일 형태의 갈륨저장소를 지닌 갈륨 액체금속이온원의 방출빔의 안정도

9.0 kV 까지 변화시키면서 이온전류를 측정하였다. 이전의 모델과 비교를 하기위해 그래프를 같이 나타내었다. 이전의 모델의 기울기가 급격한 것을 볼 때 흐름 저항이 새로운 모델보다 작아서 돌기부분이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 처음으로 빔이 방출될 때가 전압이 7.8 kV 였지만 새로운 모델은 6.0 kV 에서 처음으로 방출이 되었다.

그림 5와 그림 6은 빔의 안정도를 측정한 것이다. Heating current를 2.2 A 를 주고 4000초 동안 측정 한 것으로 $I_{rms} / I_{avg} = 2.2\%$ 이내로서 빔의 방출이 상당히 안정적임을 알 수 있다. 이전의 빔 안정성은 그림 6에 나와 있듯이 안정도가 $I_{rms} / I_{avg} = 6.5\%$ 이 내였다. 그림 5와 그림 6을 비교해 볼 때 새로운 형태의 빔 안정성이 더욱 좋다는 것을 알 수 있다. 빔 방출의 안정성에 크게 기여한 새로운 형태의 구조적인 요소로서는 액체 Ga의 흐름이 예전의 코일 형태의 heater를 사용하던 형태보다 안정적으로 나타난다는 것이다.

4. 결 론

새로운 갈륨저장소를 개발하고 제작하여 갈륨을 사용한 액체금속이온원을 제작하였다. 전압의 변화와 저장소의 표면에 흠을 형성한 구조와 흠이 형성되어 있지 않은 구조에 대한 전류-전압 특성곡선을 측정하여 선형적인 증가($dI/dV \approx 23\mu A/kV$)를 보이

는 것을 알 수 있었고 Wagner의 흐름저항에 대한 이론을 따라 예측한 빔의 방출 특성에 대한 결과로서 이전의 코일 형태의 특성곡선 측정 그래프와 비교를 해보면 새로운 모델의 LMIS가 더 낮은 전압 (6.0kV)에서 빔이 방출되는 것을 알 수 있었다. 빔 방출의 안정도는 총 방출전류량의 2.2% 이내였고, 방출되는 전류량은 공급 전압에 따라 변하였다. 본 연구에서 새로운 형태의 LMIS에 대해 측정 한 전류-전압 특성과 빔의 안정도를 통해 볼 때 이전의 코일 형태의 히터를 사용한 형태보다도 갈륨의 원활한 흐름에 의해 빔의 방출 전압이 낮아지고 빔 방출의 안정도가 향상되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 광운대학교 교내학술연구비와 산업자원에서 지원하는 차세대신기술개발과제인 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 사업으로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Z. Wan, J. G. Simmons, and D. A. Thompson, J. Appl. Phys. **81**, 765 (1997).
- [2] G. Ben Assayag, C. Vieu, and J. Gierak, J. Vac. Sci. Technol. B **11**, 2420 (1993).

- [3] L. Seliger, J. W. Ward, V. Wang, and R. L. Kubena, *Appl. Phys. Lett.* **34**, 310 (1979).
- [4] H. S. Uhm, E. H. Choi, G. S. Cho, and S. O. Kang, *Phys. Plasmas* **1**, 4105 (1994).
- [5] G. Benassayag, P. Sudraud, and B. Jouffrey, *Ultramicroscopy* **16**, 1 (1985).
- [6] G. S. Cho, Y. Seo and S. O. Kang, *J. Appl. phys.* **72**, 5892 (1992).
- [7] B. Wikens and T. Venkatesan, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1**, 1132 (1983).
- [8] L. W. Swanson G. A. Schwind, A. E. Bell, *J. Vac. Sci. Technol.* **16**, 1864 (1979).
- [9] V. Wang, J. W. Ward, *J. Vac. Sci. Technol.* **19**, 1158 (1981).
- [10] Jon Orloff, Mark Utlaut, Lynwood Swanson, *High resolution focused Ion Beams : FIB and its Applications*, (Kluwer Academic/Plenum Publishers), p.41 ~44, (2003).
- [11] A. Wagner, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 440 (1982).