creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

초소형 인공위성용 FEEP 전기추진 시스템 개발에 관한 연구

Development of FEEP Electric Propulsion for Nano-Satellite

2023년 2월

서울대학교 대학원

공과대학 협동과정 우주시스템 전공

권 찬 얼

초소형 인공위성용 FEEP 전기추진 시스템 개발에 관한 연구

Development of FEEP Electric Propulsion for Nano-Satellite

지도교수 여 재 익

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2022년 12월

서울대학교 대학원
공과대학 협동과정 우주시스템 전공
권 찬 얼

권찬얼의 석사 학위논문을 인준함
2022년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

전계 방출 전기 추진 (FEEP)은 낮은 추력과 높은 비추력 특성에 의해 초소형 위성의 심우주 탐사와 정밀 기동에 가장 적절한 이온 추력기이다. 그 중, 선형 슬릿형 방출기와는 달리 공간 효율성이 더 높고 슬릿 끝단에서의 이온빔 손실이 없는 원주형 슬릿에 관한 연구는 해외의 개념적 특허 외에 수행된 바가 없다. 따라서 이에 대한 연구를 수행하기 위해서 시스템 해석을 통해 설계의 목표치를 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 원주형 슬릿을 적용한 추력기 개발의 기초 단계로써 최대 추력 및 최소 전력을 얻기위해 필요한 전압, 슬릿 길이, 그리고 전류 밀도를 시스템 해석을 통해 계산하였다. FEEP 추력기의 기본 원리를 이해하기 위한 실험적 방법으로 테일러 콘 실험을 다양한 형태의 방출기와 ionic liquid ion source (ILIS)를 활용하여 수행하였고, 이온화 실험을 liquid metal ion source (LMIS)를 활용하여 수행하였다. 그 결과, 실험적으로 접근이 용이한 ILIS로부터 multi cones가 발생 가능하며, 원주형 슬릿에서도 multi cones가 형성 가능함을 확인하였다. 다음으로, 원주형 슬릿에서 LMIS의 액체 인듐에서 이온화가 발생하여 실제 원주형 슬릿형 방출기의 작동 가능성을 확인하였다. 마지막으로 시스템 설계 결과를 바탕으로 원주형 슬릿형 방출기와 FEEP 추력기의 프로토타입을 개발하였다.

주요어 : 전계 방출 전기 추진 추력기 (FEEP Thruster), 전계 방출 (Field Emission), 시스템 해석 (System Analysis), 테일러 콘 (Taylor Cone), 액체 금속 이온화 (Liquid Metal Ionization), 원주형 슬릿형 방출기 (Annular Slit Type Emitter), 프리웨팅 장치 (Pre-Wetting Device)
학 번 : 2021-25164

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 시스템 해석 ····· 7

2.1 시스템 모델링 ····· 7

2.2 해석 절차 ····· 11

2.3 해석 결과 ····· 13

제 3 장 테일러 콘 및 이온화 실험 ····· 18

3.1 실험 ····· 18

3.1.1 실험 장비 ····· 18

3.1.2 실험 절차 ····· 22

3.2 실험 결과 ····· 24

3.2.1 테일러 콘 실험 결과 ····· 24

3.2.2 이온화 실험 결과 ····· 29

제 4 장 추력기 제작 ····· 31

4.1 프리웨팅 장치 개발 ····· 31

4.2 방출기와 추력기 프로토타입 설계 ····· 33

4.3 방출기와 추력기 프로토타입 제작 ····· 34

제 5 장 결 론 ····· 36

참고문헌 ····· 38

Abstract ····· 42

표 목 차

Table 2.1 System requirements ····· 8

Table 2.2 Engineering characteristics and market/target value 8

Table 3.1 Emitter configurations ····· 20

Table 3.2 Accelerator configurations ····· 20

Table 3.3 Specification of water and olive oil ····· 20

Table 3.4 Specification of liquid indium ····· 22

Table 3.5 Experimental conditions for liquid indium with linear slit ····· 22

Table 4.1 Designed geometry for prototype ····· 34

그 림 목 차

Fig. 1.1. Basic principle of FEEP thruster ····· 2
Fig. 1.2. Basic principle of Taylor cone formation ····· 2
Fig. 2.1. Cross section of annular slit emitter ····· 9
Fig. 2.2. Algorithm of design procedure ····· 12
Fig. 2.3. Thrust per slit length at 5 kV emitter voltage ····· 14
Fig. 2.4. Power required per slit length at 5 kV emitter voltage 15
Fig. 2.5. Thrust per emitter voltage at 5 cm slit length ····· 15
Fig. 2.6. Power required per emitter voltage at 5 cm slit length 16
Fig. 2.7. Power vs thrust for various ion current per slit length at 2 cm slit length ····· 16
Fig. 2.8. Power vs thrust for various ion current per slit length at 3 cm slit length ····· 17
Fig. 2.9. Power vs thrust for various ion current per slit length at 4 cm slit length ····· 17
Fig. 2.10. Power vs thrust for various ion current per slit length at 2 cm slit length ····· 18
Fig. 3.1. Schematic of experiment setup ····· 19
Fig. 3.2. Three type of emitter (a) capillary (b) linear slit (c) annular slit ····· 20

Fig. 3.3. Experiment setup for ionization experiment ····· 21
Fig. 3.4. Procedure of ionization experiment ····· 23
Fig. 3.5. Experiment result of water at capillary emitter (a) 0 kV (b) 8 kV (c) 10 kV (d) 14.84 kV ····· 25
Fig. 3.6. Experiment result of olive oil at capillary emitter 25
Fig. 3.7. Experiment result of water at linear slit emitter ··· 26
Fig. 3.8. Experiment result of olive oil at linear slit emitter 26
Fig. 3.9. Experiment result of water at annular slit emitter 27
Fig. 3.10. Experiment result of olive oil at annular slit emitter 27
Fig. 3.11. Experiment result of water with constant flow rate at needle type emitter ····· 28
Fig. 3.12. Experiment result of indium at annular slit ····· 29
Fig. 3.13. Experiment result of indium at vacuum condition 30
Fig. 3.14. Measurement result of ion current ····· 31
Fig. 4.1. Pre-wetting device for slit type emitter ····· 32
Fig. 4.2. Pre-wetted emitter ····· 32
Fig. 4.3. Prototype design of slit type emitters ····· 33
Fig. 4.4. Prototype design of FEEP thruster ····· 34
Fig. 4.5. Annular slit emitter fabrication ····· 35
Fig. 4.6. FEEP thruster prototype fabrication ····· 35

제 1 장 서 론

전계방출(Field emission)이란 고전압을 방출기(Emitter)와 가속기(Accelerator) 사이에 인가하여 전위차로부터 형성된 전기장에 의해 액체가 이온화되어 이온들이 방출되는 현상을 말한다[1]. 이 방식은 electrospray 방식의 추진 장치에서 활용되고 있다[2]. 대표적인 예로는, 소형화 및 경량화가 중요한 초소형 위성은 전계 방출 방식을 활용한 FEEP (Field Emission Electric Propulsion) 추력기를 사용하기도 한다[2].

FEEP 추력기는 방출기, 가속기, 중성화기, 히터, 그리고 전력처리장치로 구성되어 있으며, 추력기의 구조는 Fig. 1.1에 나타나 있다. 이때 전도성을 가진 액체가 전기장에 놓이게 되면 액체의 형태가 표면장력에 의한 변형이 이루어지고, 전기장의 세기가 증가하여 표면장력과 같아지면 액체의 형태가 Fig. 1.2와 같이 원뿔 모형으로 형성된다[3]. 이때 형성된 원뿔의 내각과 원뿔 모양을 각각 테일러 각도(Taylor angle)와 테일러 콘(Taylor cone)이라 한다[3]. Taylor[4]에 의하면 테일러 각도는 49.3°로 1) 테일러 콘의 표면은 등전위면이며 2) 테일러 콘은 정상상태의 평형으로 존재한다는 두 가지의 가정으로부터 계산식을 세워 해를 구하여 해당 각도를 계산할 수 있다. 두 가지의 가정으로부터 세운 계산식은 식(1)과 같다.

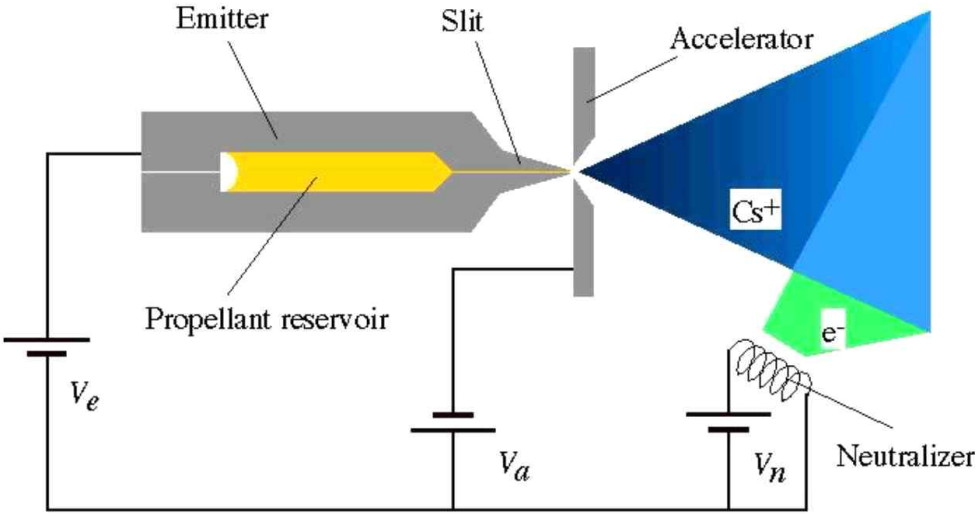


Fig. 1.1. Basic principle of FEEP thruster[5]

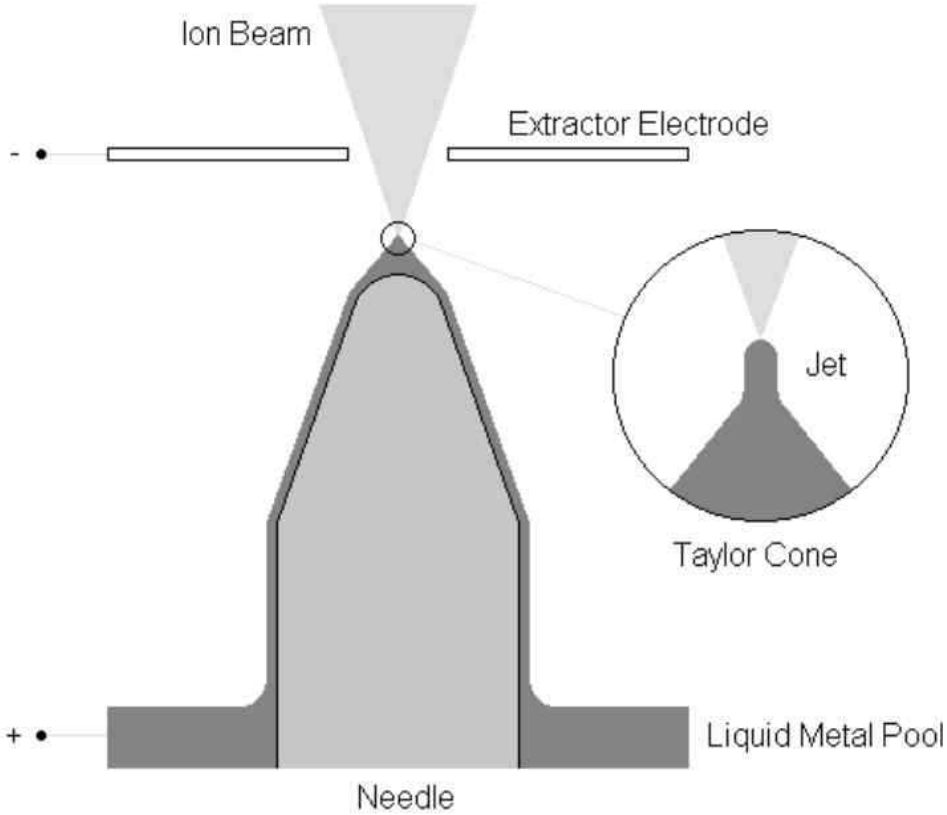


Fig. 1.2. Basic principle of Taylor cone formation[3]

$$V = V_0 + AR^{1/2}P_{1/2}(\cos\theta_0) \qquad (1)[4]$$

위 식에서 가정 1)로부터 모든 R에 대해 등전위면이므로 $V = V_0$임을 알 수 있다. 따라서 1/2차수 르장드르 다항식 $P_{1/2}(\cos\theta_0)$는 0이 되어야 하고, 0에서 π 내에 존재하는 θ_0는 130.7°가 되며, 테일러 각도는 θ_0의 여각인 49.3°가 된다[4].

테일러 콘 가시화에 관한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다. 1882년 Rayleigh[6]에 의해 액체 방울의 안정성에 대한 이론적 연구가 진행된 바 있으며, 해당 연구에서는 액체의 전하량이 표면장력보다 충분히 커지게 되면 불안정성이 증가하며 액체의 분열이 발생할 것으로 예측하였다. 이후 1917년 Zeleny[7]에 의해 높은 전위차로 인한 액체 분열 현상이 확인된 바 있다. 또한 물을 활용한 테일러 콘 가시화는 1962년 Taylor[4]에 의해 수행된 바 있으며, Gan et al.[8]에 의해 에탄올을 활용하여 액적의 특성을 실험적, 이론적으로 분석된 바 있다.

FEEP 추력기에서 방출기의 형태는 모양에 따라 니들 형태, 모세관 형태, 슬릿 형태로 크게 세 가지의 형태로 분류할 수 있다[9]. 그 중, 니들 타입은 추진제가 방출기 표면에 웨팅(wetting)이 되는 형식으로 작동을 하며, 모세관 형태와 슬릿 형태는 모세관 현상에 의해 추진제가 공급되어 작동하는 형태이다[9]. 이때 웨팅은 방출기를 액체 금속으로 아주 얇게 코팅작업을 하여 추진제가 수월하게 방출되도록 하는 것이며, 고체

와 액체 금속 사이의 화학적 상호작용에 의해 이루어진다[10]. 앞서 소개한 두 가지 형태의 방출기는 모두 단일형태로써 수십 μN 정도의 추력을 발생시킨다[11]. 따라서 수백 μN에서 mN급의 더욱 높은 추력을 발생시키기 위해서는 여러 개의 방출기를 clustering하거나 여러개의 방출부(emission site)를 가진 다중 방출기를 이용해야 한다[9].

다중 방출기 중 대표적인 형태로는 왕관(crown) 형태와 슬릿 형태가 있다[9]. 우선 왕관 형태는 여러 개의 니들 형태 방출기들이 원주형으로 배치되어 있는 형태이며 니들의 갯수 만큼 테일러 콘을 생성할 수 있어 더욱 높은 추력을 발생시킬 수 있다[9]. 이러한 형태를 적용하여 상용화시킨 대표적인 추력기로는 오스트리아 기업인 Enpulsion사의 IFM-Nano가 있다[12, 13]. 하지만 이러한 형태는 방출기 제작 및 프리웨팅(pre-wetting) 방법이 까다로우며, 추력기 한 대당 1억원을 호가한다는 단점이 있다[13].

다음으로, 선형 슬릿형 방출기는 슬릿에서 일정한 간격의 여러 테일러 콘을 형성하며 높은 이온 전류[11]와 추력대 전력비를 갖는다[12]는 장점이 있다. 하지만 제작 과정에서 과도하게 상승한 슬릿 온도에 의한 세슘 추진제의 기화 현상과 액적이 방출되는 현상으로 인해 개발이 중단된 사례가 있다[14]. 이러한 제작 과정의 문제만 해결된다면 슬릿형 방출기는 낮은 전력으로 높은 추력을 발생시키기에 가장 적절한 형태일 것이다. 더 나아가 슬릿을 원주형으로 설계한다면, 동일 면적 대비 더욱 긴 슬릿을 장착할 수 있어 공간 효율성이 높아 테일러 콘을 더 많이 형성할 수 있고, 슬릿의 끝단에서 이온들이 발산하지 않아 발생하는 이온빔의 손실

이 없을 것으로 판단된다. 또한 왕관 형태보다 구조가 단순하여 금액이 저렴하다고 판단된다. 하지만 원주형 슬릿 방출기는 1982년에 등록된 해외의 개념적인 특허[15]만 존재할 뿐 실제로 제작이 시도된 적은 없다.

본 연구는, 인듐을 추진제로 사용하고 정밀 가공 기술을 이용한 원주형 슬릿형 방출기 개발에 관한 연구를 수행하였다. 새로운 슬릿 형태에 대한 시도를 위해서는 첫째로, 이에 맞는 새로운 시스템 해석이 요구되었다. 새로운 형태의 추진시스템을 개발하기 위한 기초 단계로써 시스템 수준의 설계를 통해 대략적인 설계의 목표치를 설정하는 것은 매우 중요하다. 기초 단계의 연구로써 인공위성 및 추진시스템 중 Pulsed Plasma Thruster (PPT)의 시스템 설계 및 해석에 관한 연구는 Gulczinski et al.[16]에 의해 이루어진 바 있으며 FEEP 추력기 중 슬릿형 방출기에 대한 시스템 해석은 Badami[5]에 의해 수행된 바 있다. 앞서 수행되었던 선형 슬릿형 방출기에 관한 시스템 해석과는 다르게 본 연구에서는 원주형 슬릿형 방출기의 FEEP 추력기의 시스템 해석을 새롭게 수행하였으며 시스템 해석을 통해 새로운 형태의 원주형 슬릿형 방출기의 설계안 도출 방법을 수립하였다. 해당 방법을 이용하여 본 연구에서 목표로 하는 추력 1 mN 이상, 요구전력 100W 미만의 추력기를 개발하기 위한 주요 변수들의 설계 목표치를 산출하였다.

시스템 해석 뿐만 아니라 FEEP 추력기의 국내 개발 경험이 부재한 상황에서 실제 개발을 위해서는 기본 원리를 이해하기 위한 실험적 방법이 필요하였다. 이에 따라 원주형 슬릿에 관한 실험을 통해 테일러 콘이 생성되는 모습을 직접 확인해 봄으로써 테일러 콘의 발생 원리에 대한

이해도를 높이고 전압에 따른 테일러 콘의 형상을 확인하고자 하였다. 또한 액체 금속의 이온화 확인 및 이온 전류를 측정하고자 하였다. 액체 금속에 고전압을 인가하게 되면 대기상태 또는 공기가 남아있는 저진공 상태에서는 스트리머 방전(streamer discharge)이라는 현상이 발생하게 된다[17]. 이는 전기장에 의해 생성된 전자와 기체 분자가 충돌하면서 기체 분자에 존재하던 기존의 전자가 방출되는 이온화 현상이 발생하고, 방출된 전자는 다른 분자와 충돌하며 연쇄 반응을 일으키는 현상이다[17]. 이로 인해 전도성을 띄게된 기체가 전극 주변에 형성되며 스트리머(streamer)라는 방전이 발생한다[17]. 이 현상은 전기 전도성이 낮은 기체가 강한 전기장에 순간적으로 노출되었을 때 발생하는 현상으로 이온화 발생을 방해하게 된다[17]. 따라서 ILIS인 물, 올리브유와 LMIS인 액체 인듐을 이용하여 테일러 콘이 형성되는 전압을 산출하였다. ILIS의 경우 0.15 mm 슬릿 높이의 선형 슬릿형 방출기와 0.5 mm 슬릿 높이의 원주형 슬릿형 방출기를 제작하고, 이를 이용하여 테일러 콘이 생성되는 모습을 직접 확인해 봄으로써 슬릿형 방출기에서 테일러 콘의 발생 원리에 대한 이해도를 높이고자 하였다. LMIS의 경우 20 μm 슬릿 높이의 원주형 슬릿형 방출기를 제작하여 액체 금속의 테일러 콘 생성 모습을 확인해 보고자 하였다. 또한 스트리머 방전이 발생하지 않도록 1×10^{-5} torr 이하의 고진공 상태에서 액체 금속의 이온화 현상을 확인해 보고자 하였다.

이렇게 시스템 해석과 테일러 콘 실험을 통해 시스템 요구조건을 충족시킬 수 있는 설계안을 산출하고자 하였다. 그리고 해당 결과들을 토대로 실제 원주형 슬릿형 방출기와 FEEP 추력기의 프로토타입을 개발

하고자 하였다. 또한 슬릿형 방출기를 위한 프리웨팅 장치를 개발하고자 하였다. 시스템 해석과 테일러 콘 실험, 방출기 및 추력기, 그리고 슬릿형 방출기를 위한 프리웨팅 장비 개발에 대한 자세한 내용은 본론에서 설명하였다.

제 2 장 시스템 해석

2.1 시스템 모델링

본 연구는 현재 진행 중인 FEEP 추력기의 프로토타입 제작을 위한 연구의 첫 단계로 시스템 해석을 통해 방출기의 슬릿 길이에 따른 추력, 비추력, 요구전력을 산출하고자 하였다. 우선 추력기의 시스템 요구조건은 Table 2.1과 같으며, 이를 만족시킬 수 있는 추력기를 개발하기 위해 추력기 전체 시스템을 각각의 서브 시스템으로 분해 후 engineering characteristics(EC)를 도출하였다. 또한 도출된 EC를 현재 상용화되어있는 추력기의 market value를 토대로 목표 설계치인 target value를 최종 도출하였다. 최종 도출된 EC와 target value는 아래의 Table 2.2에 제시되어 있다. EC 중 방출기 전압의 경우, 현재 상용화되어있는 4~10 kV를 기준[12]으로 좀 더 넓은 범위인 3~11 kV로 목표치를 설정하였다. 또한, 방출기의 전류 밀도(슬릿 길이당 전류)의 경우 Mitterauer의 실험 결과인 0.3 mA/mm[18]로 목표치를 설정하였다. 마지막으로, 슬릿 길이를 설계변수로 지정하여 슬릿 길이를 조절하여 요구조건을 달성하도록 하였다.

앞서 도출된 EC와 성능 요구조건의 항목들 간의 관계를 파악하기 위해, 우선 기존의 연구들에서 사용한 선형 슬릿과 본 연구에서 개발한 원주형 슬릿의 유사성을 알아보았다. Figure 2.1로부터 원주형 슬릿형 방출기의 단면 형상은 선형 슬릿형 방출기의 단면 형상이 축대칭 된 모습으로, 두 가지의 방출기 형상이 동일하다는 것을 파악하였고, 따라서 Mühlich[19]가 선형 슬릿에서 사용한 식 (1)과 (2)의 경험식들을 활용하여 원주형 슬릿의 해석을 진행하였다.

Table 2.1 System requirements

Parameters	Requirements
Thrust	Over 1 mN
Specific thrust	Over 1500 s
Power	Less than 100 W
Weight	About 3 kg

Table 2.2 Engineering characteristics and market/target value

Engineering characteristics	Market value	Target value
Emitter voltage	4 ~ 10 kV[12]	3 ~ 11 kV
Emitter current	0.3 mA/mm[18]	0.3 mA/mm
Slit height	20 ~ 4 μm[15]	20 ~ 4 μm
Slit length	1.5 cm[18]	Design variable
Divergence angle	20°	20°

$$l_{jet} \approx \frac{2}{3\pi\gamma}\sqrt{\frac{m}{2e} \cdot V_{em}} \cdot I_{em} \qquad (1)[19]$$

$$\theta \approx 23.55 + 0.41 \cdot I_{em} + (-0.66 - 0.02 \cdot I_{em}) \cdot V_{em} \qquad (2)[19]$$

식 (1)에서 l_{jet}는 jet의 길이, V_{em}는 방출기의 전압, I_{em}는 방출기의 전류, e는 전하량, m은 추진제 질량, 그리고 γ는 추진제의 표면장력을 나타내며, 식 (2)에서 θ는 이온의 발산 각도를 나타낸다. 식 (1)으로부터 l_{jet}와 V_{em}에 따른 I_{em}의 값을 산출할 수 있으며, 이렇게 산출된 I_{em}을 통해 식 (2)으로부터 θ를 도출해 낼 수 있다.

다음으로 FEEP 추력기의 성능을 계산하기 위해 아래의 식 (3)~(10)을 이용하여 시스템 모델링을 진행하였다. 식 (3)~(7)과 같이 이온 발산 각도와 EC 중 방출기의 전압과 전류를 통해 추력, 비추력, 방출기의 전력을 산출할 수 있다. 또한, 식 (8)과 같이 가속기의 전압, 전류를 통해 가속기의 전력을 계산할 수 있으며, 식 (9)와 같이 중성화기 한 개당 전력에 중성화기의 개수를 곱하여 중성화기 전체의 전력을 알 수 있다. 마지막으로 식 (10)과 같이 중성화기, 가속기, 방출기, 그리고 히터의 전력을 모두 합하여 시스템 전체의 전력을 산출할 수 있다.

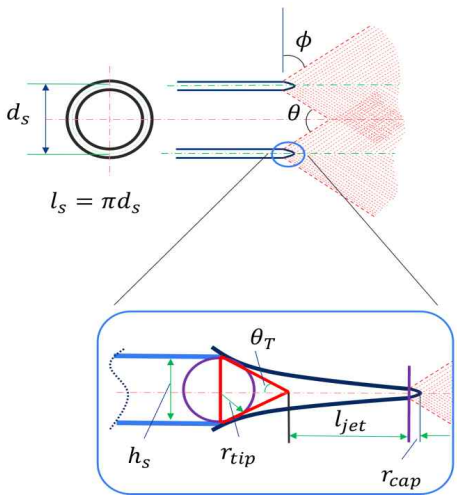


Fig. 2.1. Cross section of annular slit emitter

$$f = \frac{\sin(\theta)}{\theta} \tag{3}$$

$$F = I_{em}\sqrt{\frac{2V_{em}m_{in}}{e}}\,f \qquad (4)[17]$$

$$I_{sp} = \frac{1}{g}\sqrt{\frac{2V_{em}e}{m_{in}}}\,f\eta \qquad (5)[17]$$

$$P_{em} = V_{em} \times \frac{I_{em}}{1000} \tag{6}$$

$$I_{em} = \frac{I_{em}}{l_s}\left(\frac{l_s}{100}\right) \cdot 1000 \tag{7}$$

$$P_{acc} = abs(V_{acc}) \times \frac{I_{acc}}{1000} \tag{8}$$

$$P_{neut} = No.\ of\ Neutralizers \cdot P_{per\ neut} \tag{9}$$

$$P_{Total} = P_{neut} + P_{acc} + P_{em} + P_{heat} \tag{10}$$

여기서 f는 추력 계수, F는 추력, m_{in}은 인듐 원자의 질량인 1.907×10^{-25} kg, η는 질량 효율, I_{sp}는 비추력, g는 중력가속도인 9.81 m/s^2, P_{em}는 방출기의 전력, $\frac{I_{em}}{l_s}$은 전류 밀도, l_s은 슬릿의 길이, P_{acc}는 가속기의 전력, P_{neut}는 중성화기 전체 전력, $P_{per\ neut}$는 중성화기 한 개당 전력, P_{Total}은 추력기 전체의 전력, 그리고 P_{heat}는 히터의 전력을 나타낸다.

2.2 해석 절차

본 연구의 핵심 철학은 추력은 가능한 높게, 전력은 가능한 낮게 설계를 하는 것이다. 이에 따라, 추력기를 설계하는데 있어 가장 중요한 변수인 l_s, $\frac{I_{em}}{l_s}$, 그리고 V_{em}를 아래의 식 (11)~(13)와 같이 순차적으로 시스템 모델에 대입하여 시스템 요구조건을 만족할 수 있는 값을 도출하였다.

$$l_s \in (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) \tag{11}$$

$$\frac{I_{em}}{l_s} \in (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8) \tag{12}$$

$$V_{em} \in [0 - 5000] \tag{13}$$

세 개의 중요한 변수들의 시스템 요구조건을 만족할 수 있는 값을 산출해 내는 절차는 Fig. 2.2와 같다. 우선 세 개의 변수들의 가장 낮은 값부터 시스템 모델에 대입하여 추력과 전력을 산출해 낸다. 이후 해당 값들이 성능요구조건에 부합하는지 확인한 후 충족하지 못했을 경우 변수들을 점차 증가시켜가며 대입하여 요구조건을 만족시키는 값을 도출해 낸다.

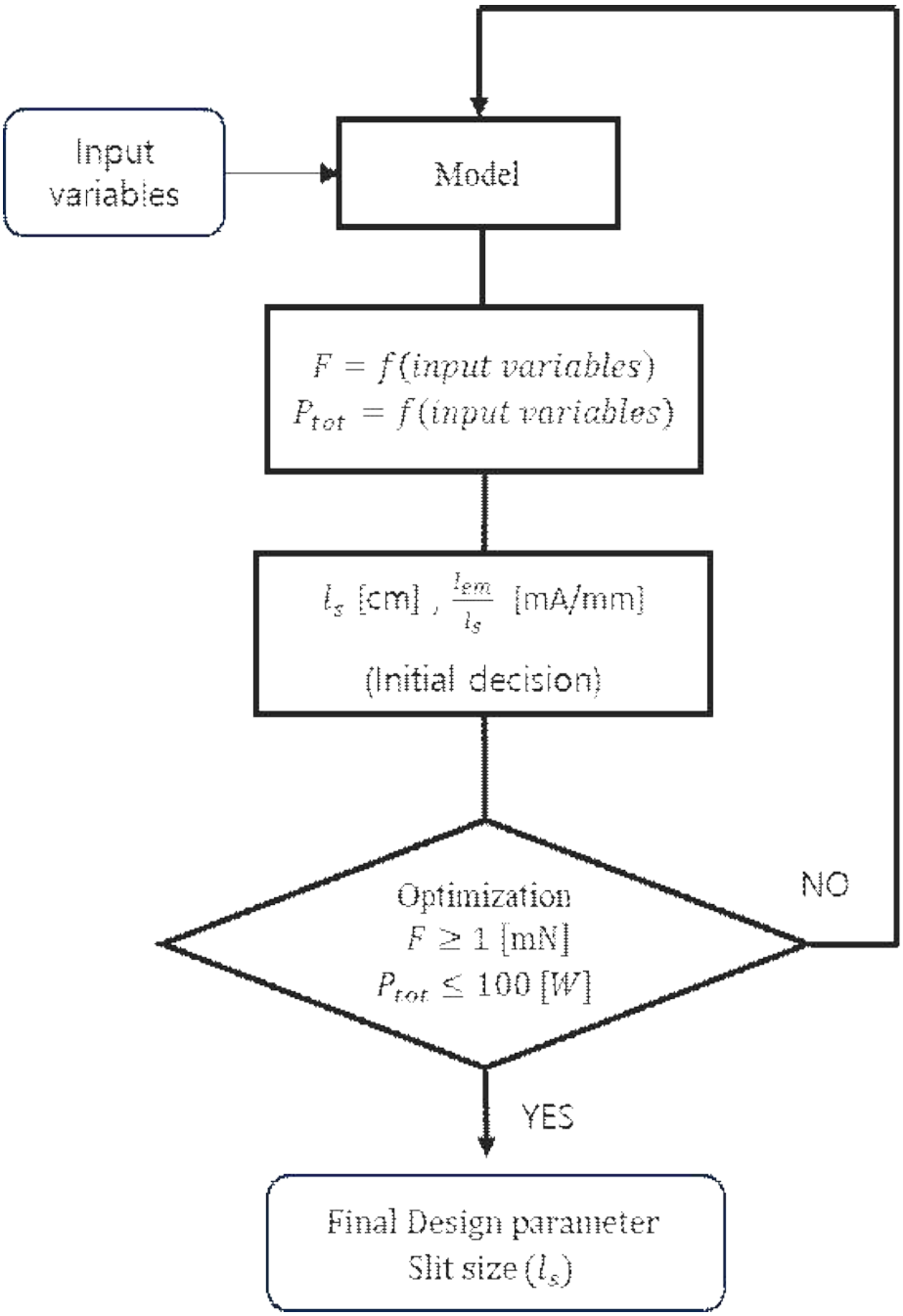


Fig. 2.2. Algorithm of design procedure

2.3 해석 결과

시스템 해석 결과, Fig. 2.3과 2.4와 같이 방출기의 전압이 5 kV일 때 전류 밀도가 일정할 경우, 슬릿 길이가 증가함에 따라 추력과 요구전력이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이 경우, 슬릿 길이가 5 cm일 때 대부분 요구추력을 만족하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 전류 밀도는 0.1, 0.2, 0.3 mA/mm일 때만 요구전력을 만족하였다.

따라서 슬릿 길이를 5 cm로 설정하고 해석을 진행한 결과 Fig. 2.5와 2.6과 같이 방출기의 전압이 2.5~5 kV일 경우 전류 밀도가 0.3~0.8 mA/mm일 때 요구추력을 만족하는 것을 볼 수 있었다. 반면, 전류 밀도가 0.1~0.5 mA/mm일 때 요구전력을 만족하는 것을 볼 수 있었다.

앞에서 산출한 결과를 토대로 요구추력을 만족하기에 가장 적절한 방출기 전압 범위인 2.5~5 kV 구간에서 슬릿의 길이를 바꿔가며 결과를 산출하였다. 이때, 슬릿 전류 밀도는 보편적으로 0.4 mA/mm로 계산하지만, 본 연구에서는 25%의 마진을 주어 0.3 mA/mm를 기준으로 잡아 해석을 진행하였다. 또한 높은 슬릿 길이 당 전류를 얻기는 힘들기 때문에 가능한 슬릿 길이를 증가시켜 요구조건을 달성하도록 설계 하였다. Figure 2.7~2.10은 각각 슬릿의 길이가 2, 3, 4, 5 cm 일 때 해석한 결과이다.

해석 결과 2 cm 길이의 슬릿의 경우, 요구추력과 요구전력을 모두 만족하는 가장 적절한 전류 밀도의 구간은 0.7 mA/mm임을 알 수 있었다.

이처럼 3 cm의 경우는 0.5 mA/mm, 4 cm의 경우는 0.4 mA/mm, 그리고 5 cm의 경우는 0.3 mA/mm임을 알 수 있었다. 네 가지의 해석 결과를 토대로 최종 도출한 추력기 설계 변수 다음과 같다. 슬릿의 길이는 5 cm, 방출기 전압은 2.5~5 kV, 전류 밀도는 0.3 mA/mm이다.

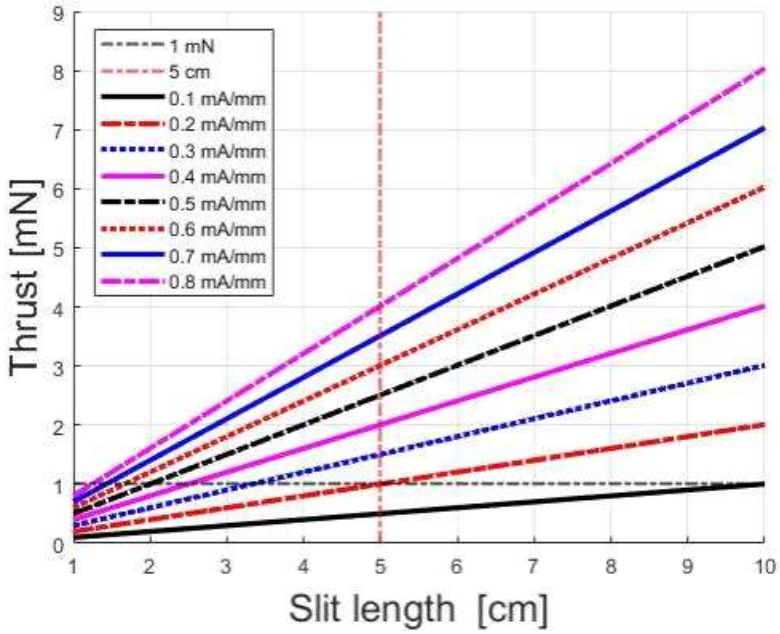


Fig. 2.3. Thrust per slit length at 5 kV emitter voltage

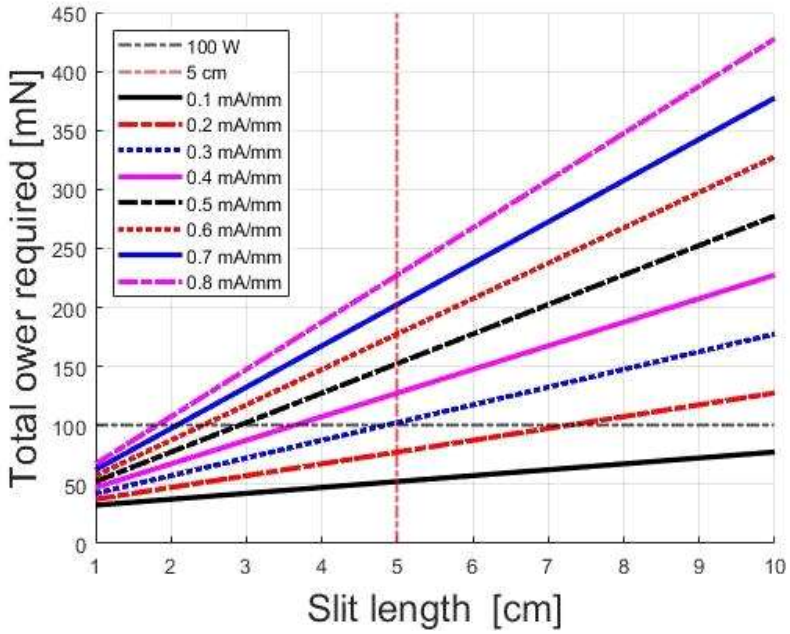


Fig. 2.4. Power required per slit length at 5 kV emitter voltage

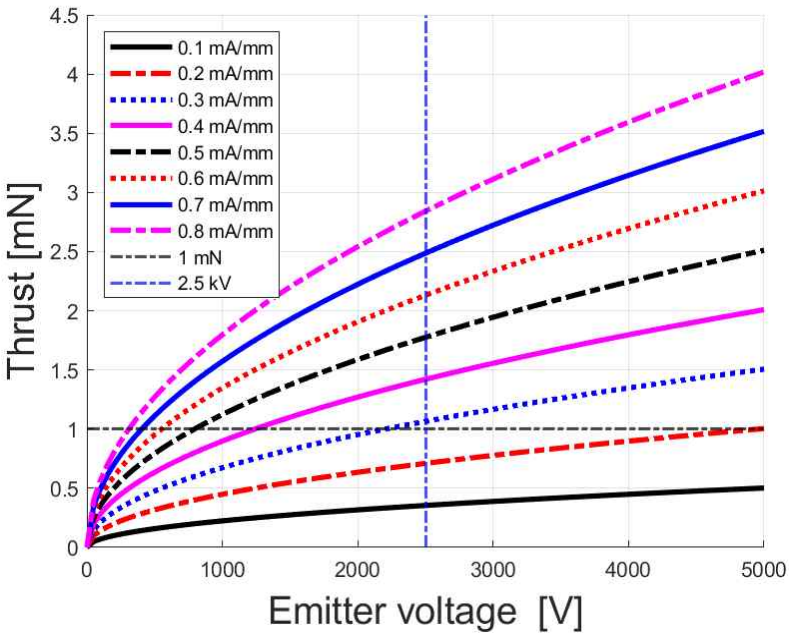


Fig. 2.5. Thrust per emitter voltage at 5 cm slit length

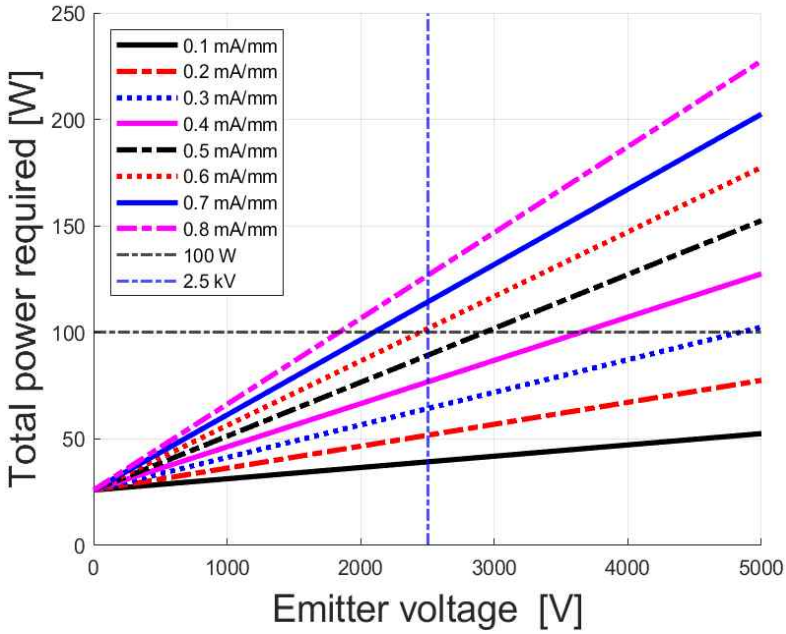


Fig. 2.6. Power required per emitter voltage at 5 cm slit length

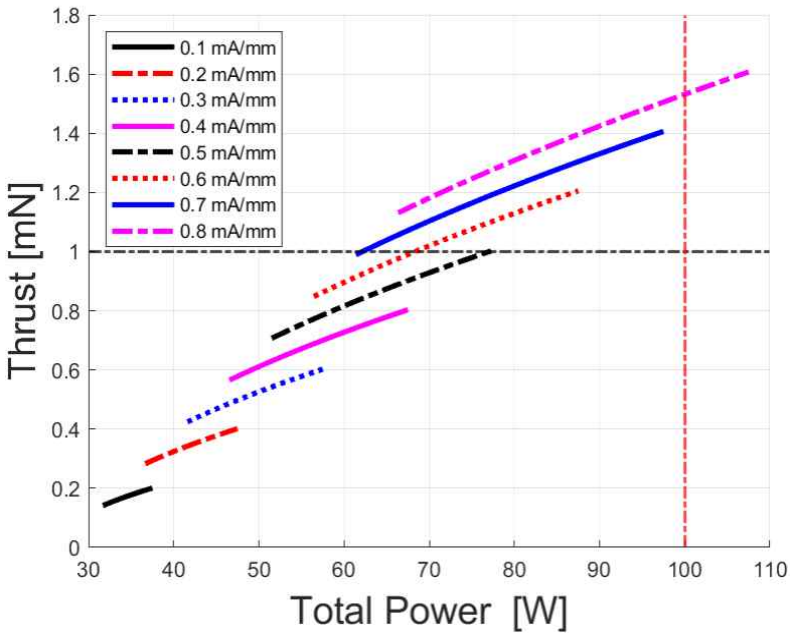


Fig. 2.7. Power vs thrust for various ion current per slit length at 2 cm slit length

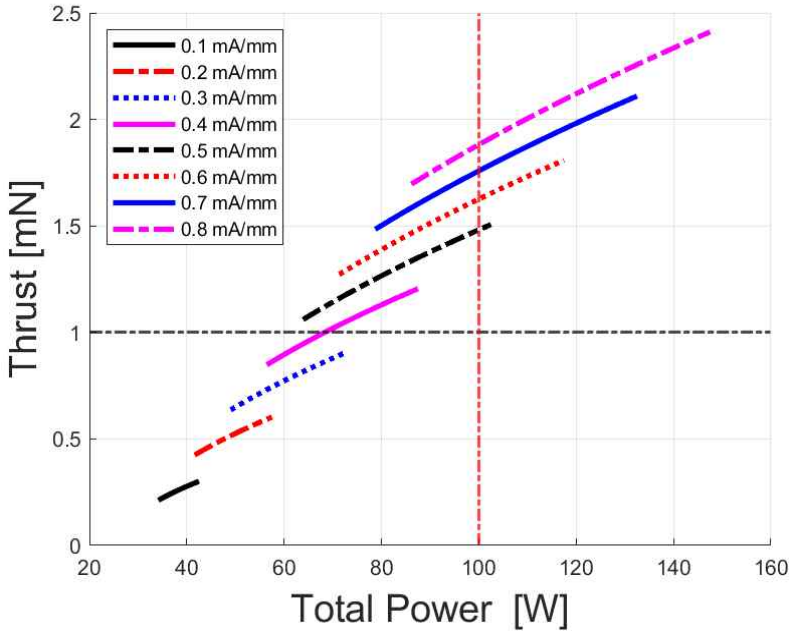


Fig. 2.8. Power vs thrust for various ion current per slit length at 3 cm slit length

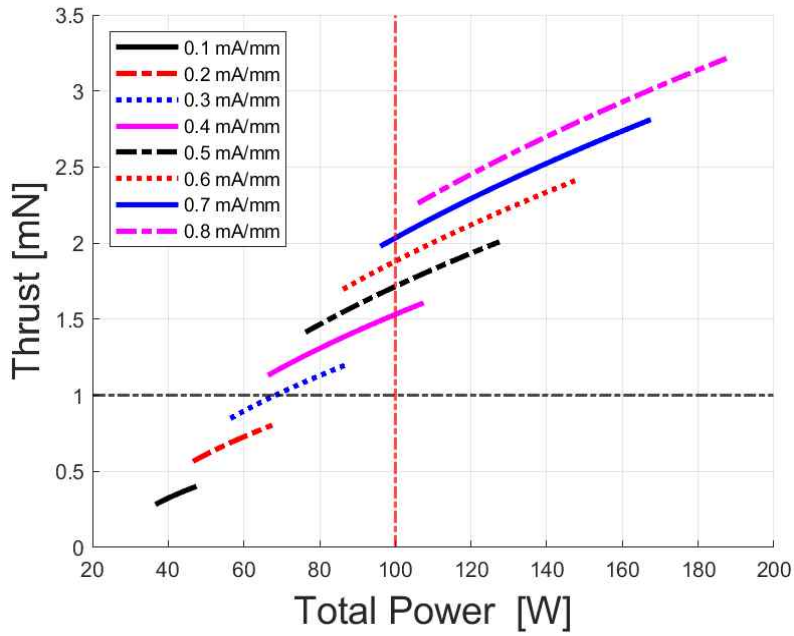


Fig. 2.9. Power vs thrust for various ion current per slit length at 4 cm slit length

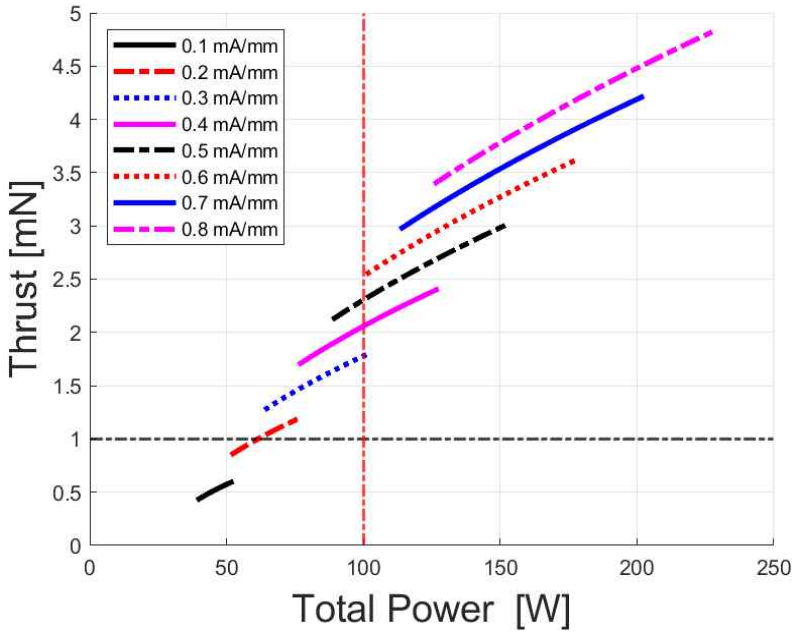


Fig. 2.10. Power vs thrust for various ion current per slit length at 5 cm slit length

제 3 장 테일러 콘 및 이온화 실험

3.1 실험

3.1.1 실험 장비

앞서 수행한 시스템 해석 방법 이외에 프로토타입 제작을 위한 필수적인 실험을 통해 테일러 콘의 발생 원리에 대한 이해도를 높이고 실험적 방법을 통해 프로토타입을 설계하고자 하였다. 테일러 콘 실험장치는 Taylor[4]를 참조하여 Fig. 3.1과 같이 설계 및 제작하였

테일러 콘을 가시화를 위한 방출기는 Fig. 3.2와 같이 알루미늄 재질

의 모세관 형태, 선형 슬릿 형태, 그리고 원주형 슬릿 형태 총 세 가지 모양으로 제작하였으며 각각에 대한 치수는 Table 3.1에 제시되어 있다. 가속기도 알루미늄 재질의 plate 형태에 가운데 원형 구멍을 내어 제작하였다. 가속기에 대한 치수는 Table 3.2에 제시되어 있다. 또한 가시화를 위한 액체로는 물과 올리브유를 이용하였으며, 이에 대한 물성치는 Table 3.3에 제시되어 있다.

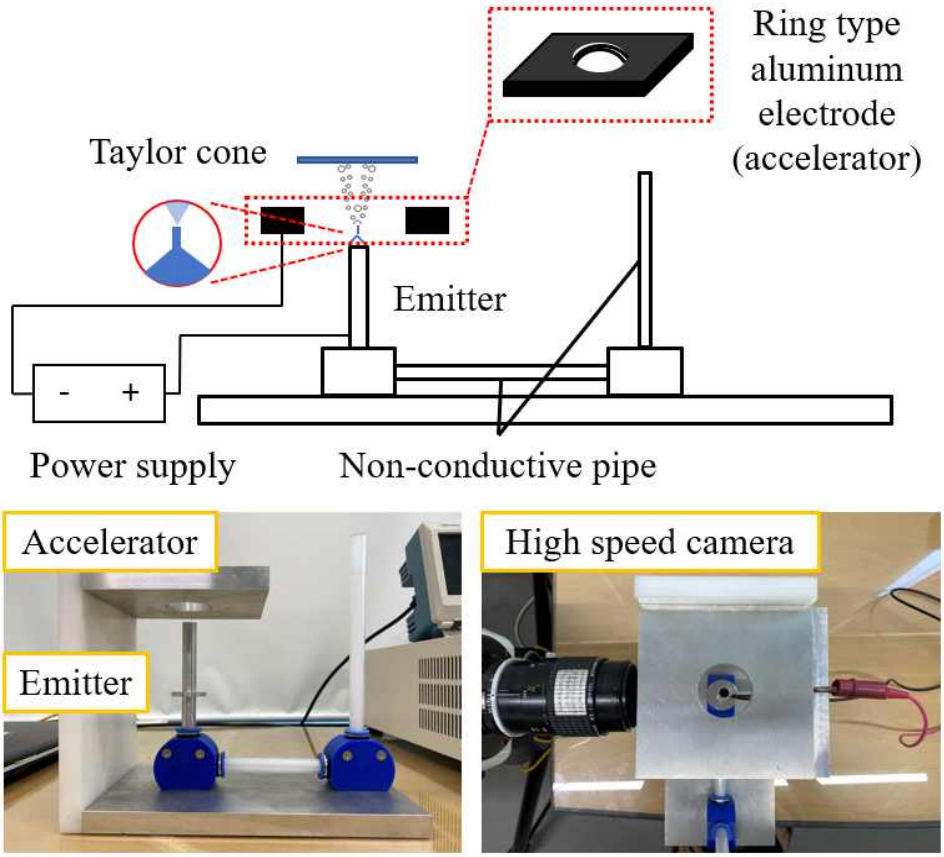
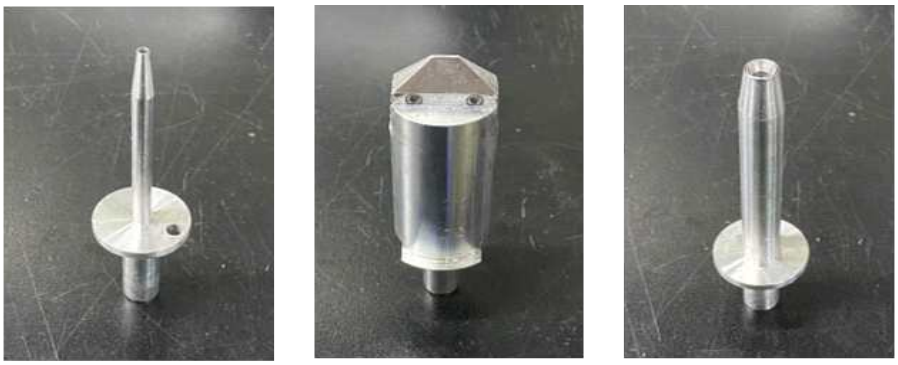


Fig. 3.1. Schematic of experiment setup



(a) (b) (c)

Fig. 3.2. Three type of emitter (a) capillary (b) linear slit (c) annular slit

Table 3.1 Emitter configurations

Type	Inner diameter [mm]	Slit height [mm]	Slit length [mm]
Capillary	2	-	-
linear slit	-	0.15	6
annular slit	-	0.5	50

Table 3.2 Accelerator configurations

Inner diameter [mm]	Width [mm]	Height [mm]	Length [mm]	Distance to emitter [mm]
40	125	10	120	6.4

Table 3.3 Specification of water and olive oil

Type	Surface tension [mN/m]	Viscosity [mPa·s]	Conductivity [S/m]	Molecular weight [g/mol]
Water	72.6	1	0.02~0.08	18
Olive oil	35.8	84	0.32	1382

다음으로 인듐을 이용한 이온화 실험에서는 Fig. 3.3과 같은 실험 장치를 이용하였다. 해당 장치는 알루미늄 재질의 원기둥 모양의 추진제 탱크가 있고, 탱크 안에는 인듐을 액체 상태로 유지하기 위한 히터가 있다. 인듐을 실험을 위한 원주형 슬릿형 방출기는 텅스텐을 이용하여 제작을 하였으며, 가속기는 알루미늄을 이용하여 고리 형태로 제작하였다. 또한 Table 3.4와 3.5은 각각 인듐의 물성치와 실험 조건을 나타내었다.

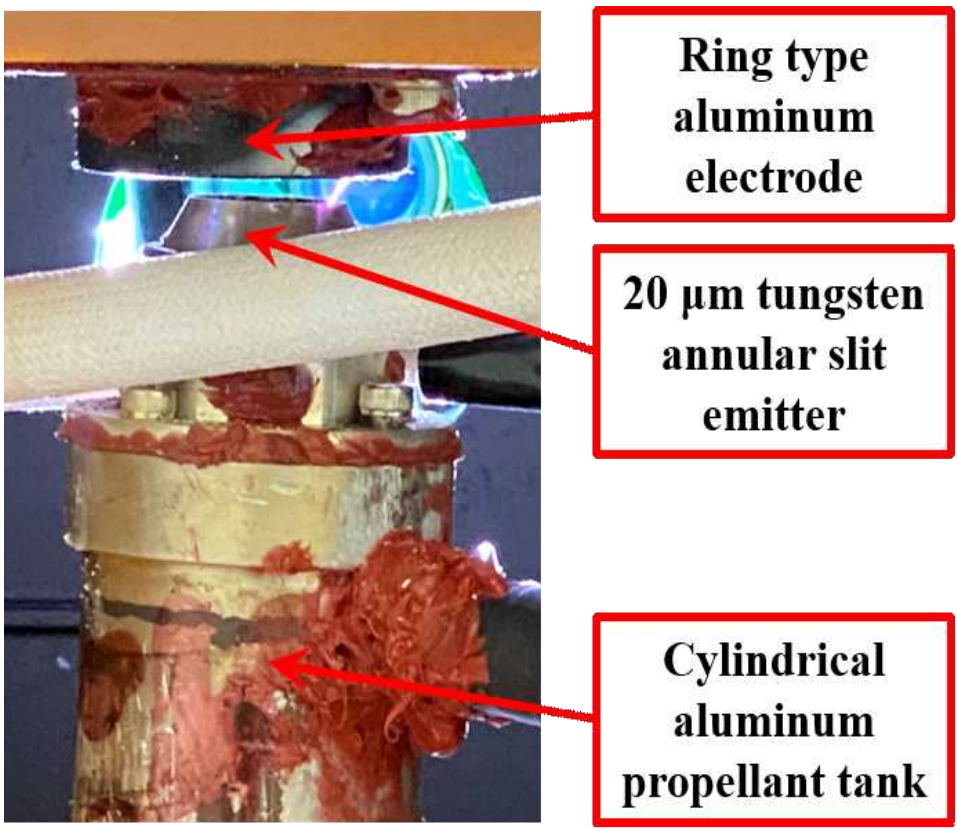


Fig. 3.3. Experiment setup for ionization experiment

Table 3.4 Specification of liquid indium

Type	Surface tension [mN/m]	Viscosity [mPa·s]	Conductivity [S/m]	Molecular weight [g/mol]
Indium	530~570	1.75	1.2×10^{7}	114.8

Table 3.5 Experimental conditions for liquid indium with linear slit emitter

Slit height	Voltage [kV]		
	Accelerator	Emitter	Total
20 μm	-6	6	12

3.1.2 실험 절차

이와 같이 제작된 실험장비와 액체들을 이용하여 다음과 같은 절차로 테일러 콘 실험을 수행하였으며, Fig. 3.4와 같이 이온화 실험을 수행하였다.

1. 가속기에 (-)극, 방출기에 (+)극 연결
2. Table 6과 같이 (-)극에는 기준전압을 -4 kV로 설정하고, (+)극을 +5~8 kV 까지 1kV 씩 증가시키며 테일러 콘 생성 모습 관찰
3. 테일러 콘 형성 시 양쪽 전압을 합하여 전체 전압 측정
4. 액체별로 테일러 콘 형성 전압 측정 및 콘의 개수 파악
5. 액체들의 물성치와 테일러 콘 사이의 관계 분석

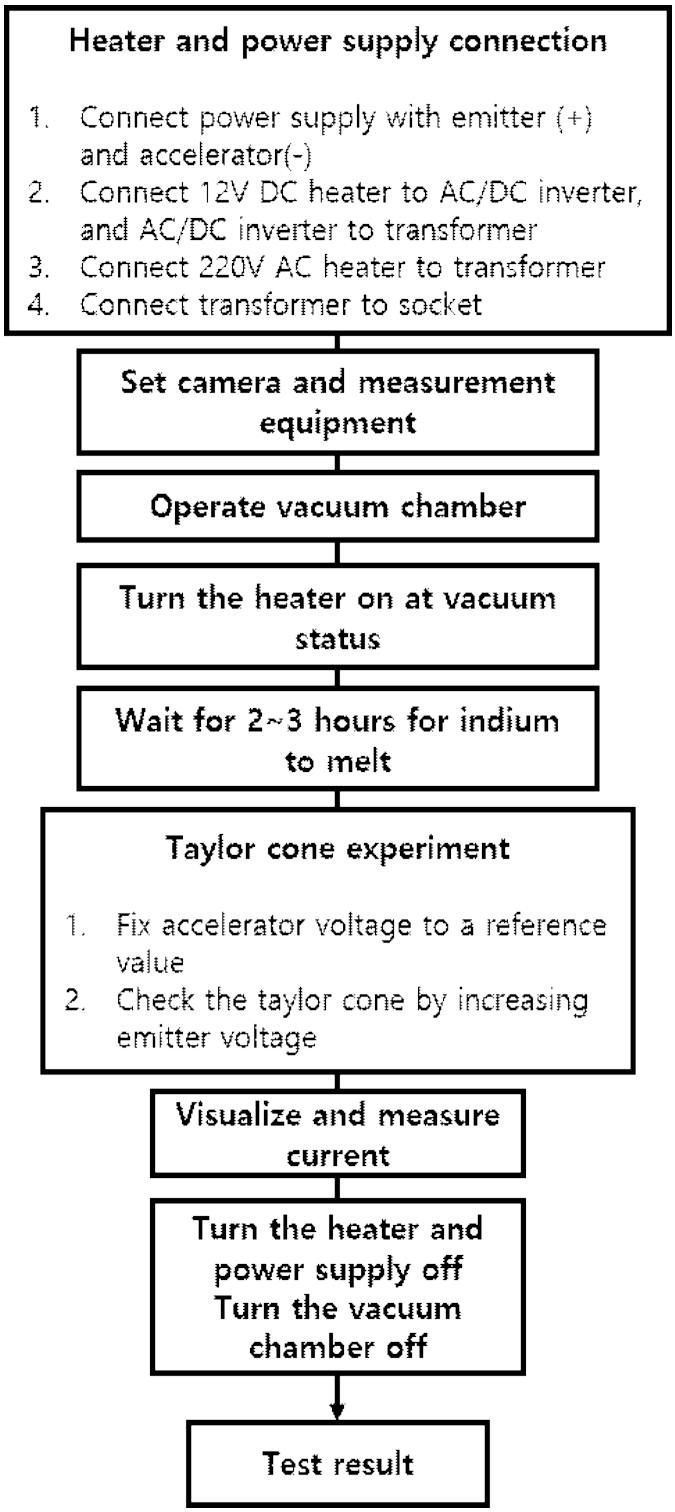


Fig. 3.4. Procedure of ionization experiment

3.2 실험 결과

3.2.1 테일러 콘 실험 결과

모세관 형태의 방출기에서 물의 경우 Fig. 3.5와 같이 전위차가 증가함에 따라 반구 형태의 표면이 상승하는 것을 볼 수 있었다. 전위차가 증가하여 10 kV 부근에 도달하였을 때, Fig. 3.5(c)와 같이 불안정성이 증가하였다. 이후 전위차가 더욱 증가하여 14.84 kV에 도달하였을 때, 가장 안정적인 테일러 콘과 single cone jet가 형성되었다.

반면 올리브유의 경우 Fig. 3.6과 같이 물보다 더 낮은 전위차인 12~13 kV 부근에서 테일러 콘과 single cone jet가 형성되었다. 이는 올리브유의 표면장력이 물보다 낮아 테일러 콘을 생성하기 위한 전기장의 세기가 낮기 때문이다[20].

다음으로 선형 슬릿에서 물의 경우 Fig. 3.7과 같이 낮은 점성에 의해 11 kV 부근에서 슬릿의 한쪽 가장자리에서만 테일러 콘과 single cone jet가 형성되었다. 반면 올리브유의 경우 높은 점성에 의해 12~14 kV 부근에서 슬릿의 양쪽 가장자리에서 테일러 콘과 multi cone jets가 형성되었다.

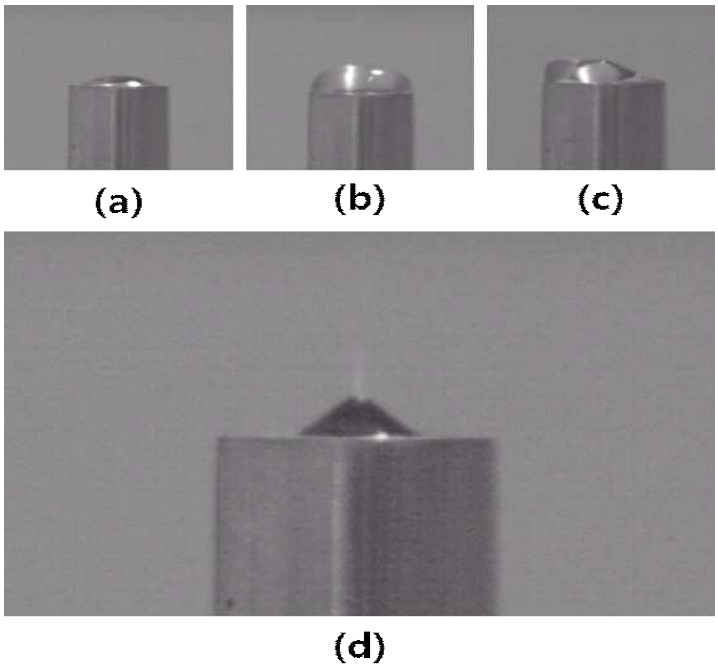


Fig. 3.5. Experiment result of water at capillary emitter (a) 0 kV (b) 8 kV (c) 10 kV (d) 14.84 kV

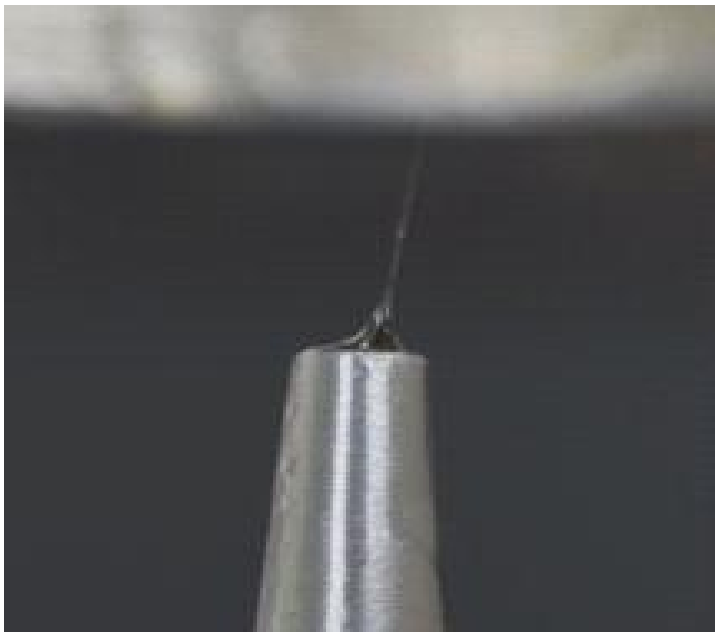


Fig. 3.6. Experiment result of olive oil at capillary emitter

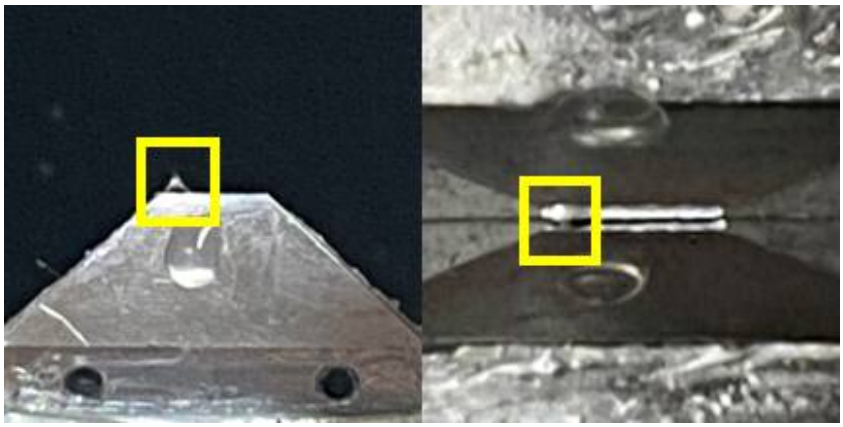


Fig. 3.7. Experiment result of water at linear slit emitter

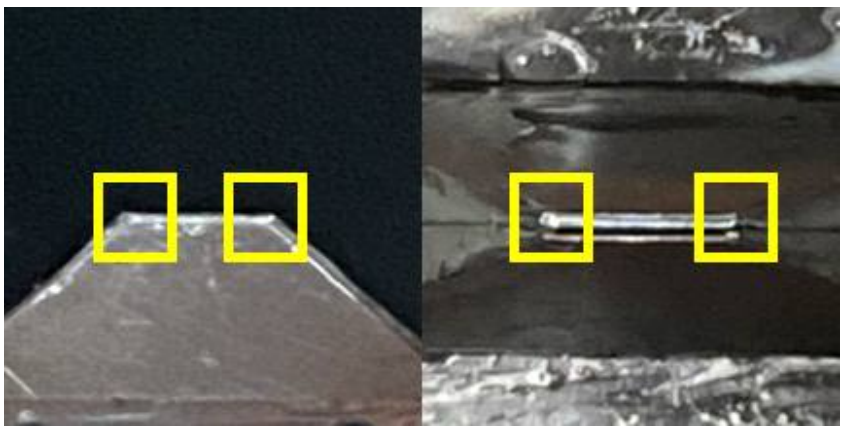


Fig. 3.8. Experiment result of olive oil at linear slit emitter

세 번째로 원주형 슬릿에서 물의 경우 Fig. 3.9와 같이 11~12 kV 부근에서 한쪽으로 치우쳐진 테일러 콘과 single cone jet가 발생하였다. 하지만 올리브유의 경우 Fig. 3.10과 같이 11.5~12.5 kV에서 여러 방향으로 테일러 콘과 multi cone jets가 형성되었다. 추가로 액체의 유량을 일정하게 유지하며 매우 작은 주삿바늘을 이용하여 실험을 수행한 결과 Fig. 3.11과 같이 매우 안정적인 테일러 콘과 single cone jet가 형성되었다.

Fig. 3.9. Experiment result of water at annular slit emitter

Fig. 3.10. Experiment result of olive oil at annular slit emitter

Fig. 3.11. Experiment result of water with constant flow rate at needle type emitter

지금까지의 실험은 물과 올리브유를 이용한 ILIS에 관한 실험이었다. ILIS은 고전압을 이용하여 이온빔을 생성하는 방법이 LMIS와 매우 유사하여[21] 이를 통해 방출기의 형상에 따른 LMIS의 테일러 콘 생성 모습을 유추해 볼 수 있다. 또한, 상온에서 실험이 가능하기 때문에[21] 실험적인 방법에서 접근하기 용이하다는 장점이 있어 개발 초기 다양한 실험을 수행해 볼 수 있었다.

3.2.2 이온화 실험 결과

ILIS 실험 이후 LMIS 실험은 LMIS의 정확한 물리현상을 파악하고 ILIS와의 차이점을 확인하기 인듐을 이용하여 수행되었다. 실험 결과 20 μm 슬릿 높이의 원주형 슬릿에서 인듐의 경우 대기 중에서 Fig. 3.12와 같이 6~7 kV 부근에서 액체 인듐이 슬릿에서 방출되는 모습을 관찰할 수 있었다. 하지만 슬릿의 일부분에서만 방출된 것으로 보아 슬릿이 균일하지 않을 가능성이 있어 현미경 또는 레이저 측정기 등을 활용하여 슬릿의 균일도 및 프리웨팅(Pre-wetting) 정도를 측정할 예정이다. 또한 7 kV 이상에서 방전현상이 발생한 것으로 보아 액체 인듐의 테일러 콘 형성 및 이온화를 관찰하기 위해서는 진공상태에서 실험을 수행해야 하는 것을 확인하였다.

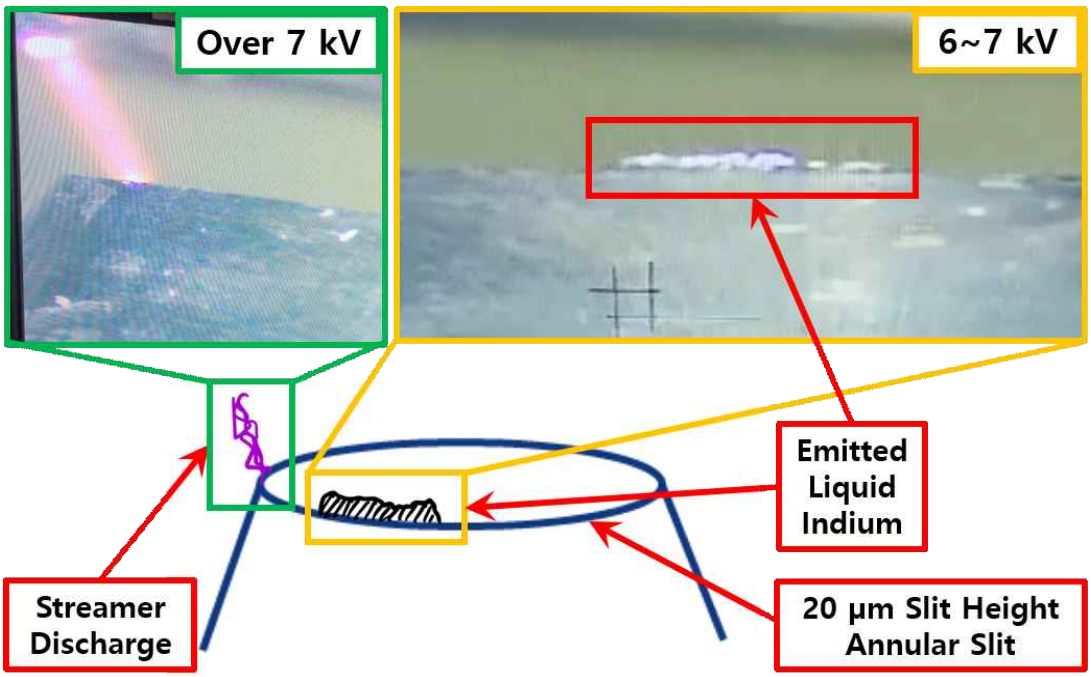


Fig. 3.12. Experiment result of indium at annular slit

다음으로 동일한 방출기를 이용하여 1×10^{-5} torr 이하의 고진공 상태에서 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 3.13과 같이 12 kV에서 액체 인듐이 슬릿에서 방출되었으며, 방출된 인듐의 끝 부분에서 푸른색의 빛을 내며 이온화가 발생한 것을 관찰하였다. 또한 Fig. 3.14와 같이 고전압 발생장치로부터 양극(방출기)에서 4.35 mA, 음극(가속기)에서는 0 mA가 측정이 되었다. 이는 양극에서는 전하가 방출 또는 흡수 되었으나 음극에서는 어떠한 현상이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 따라서 양극(방출기)에서 액체 인듐이 이온화 되어 이온들이 방출되었다고 판단할 수 있으며, 이온 전류는 4.35 mA 임을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 이온 전류 밀도를 0.3 mA/mm로 설정하였기 때문에 14.5 mm에서 이온이 방출되었으며, 이로부터 290 μN의 추력이 발생했음을 계산할 수 있다.

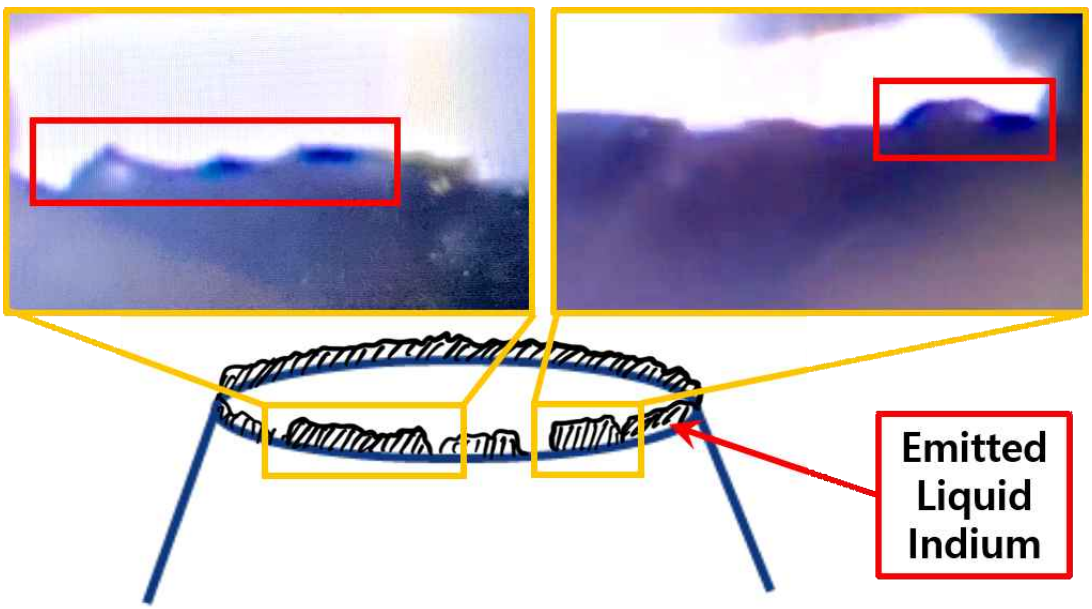


Fig. 3.13. Experiment result of indium at vacuum condition

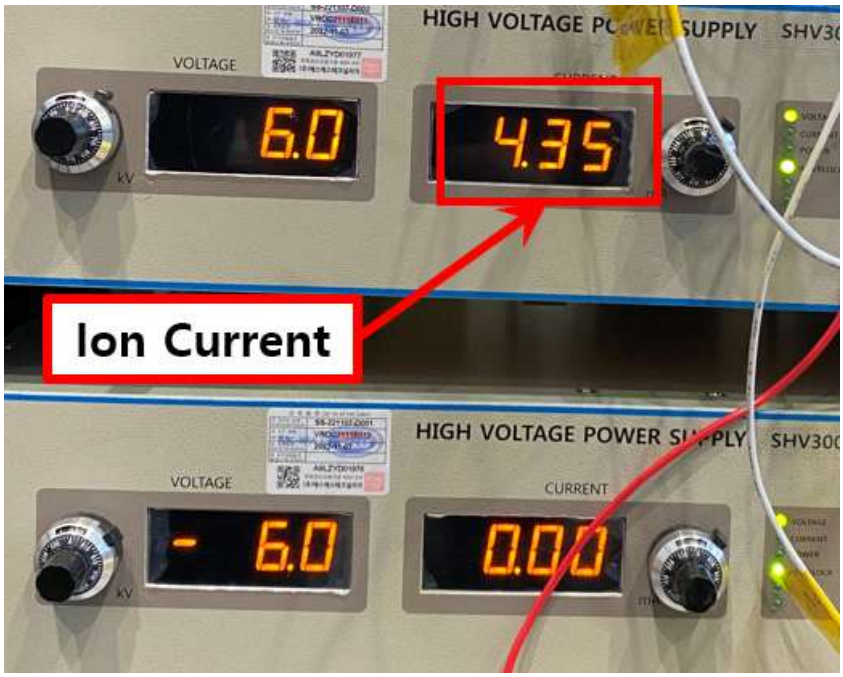


Fig. 3.14. Measurement result of ion current

제 4 장 추력기 제작

4.1 프리웨팅 장치 개발

액체 인듐이 방출기를 통해 수월하게 방출되기 위해서는 프리웨팅 작업이 필수적이다. 이에 따라 Fig. 4.1과 같이 슬릿형 방출기를 위한 프리웨팅 장치를 개발하였다. 장치의 작동 원리로는 장치 아래에 있는 driving motor를 이용하여 ball screw를 회전시키게 되면, 회전하는 ball screw가 피스톤이 붙어있는 판을 밀어 올리게 된다. 이후 추진제 탱크 내부에 있는 액체 인듐은 피스톤에 의해 밀려 올라가게 되고 슬릿 내부

가 웨팅이 되는 원리이다. 이 장치를 이용하여 프리웨팅한 방출기의 모습은 Fig. 4.2와 같으며, 이를 통해 프리웨팅이 균일하게 되었음을 알 수 있다.

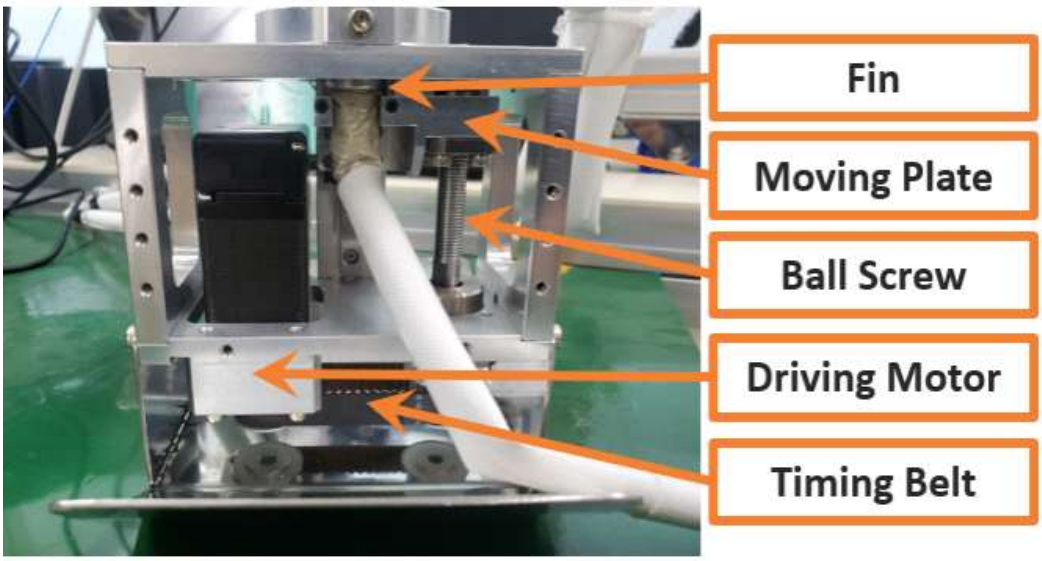


Fig. 4.1. Pre-wetting device for slit type emitter

Fig. 4.2. Pre-wetted emitter

4.2 방출기와 추력기 프로토타입 설계

시스템 설계 결과를 바탕으로 1U 사이즈의 선형/원주형 슬릿형 방출기와 추력기의 프로토타입을 설계 및 제작하였다. 우선 방출기의 경우 Fig. 4.3과 같이 설계 하였으며 방출기의 재질은 텅스텐, 나머지 부분의 재질은 알루미늄을 이용하였다. 추력기 프로토타입의 경우 Table 4.1과 Fig. 4.4와 같이 설계 하였으며 가속기와 하우징은 알루미늄 재질을 이용하였다.

Fig. 4.3. Prototype design of slit type emitters

Table 4.1 Designed geometry for prototype

Slit emitter	Slit height	4 μm
	Slit length	50 mm
Neutralizer plate	Width	10 cm
	Height	10 cm
Accelerator ring	Inner diameter	20 mm
	Outer diameter	25 mm
Propellant tank (cylindrical)	Height	24 mm
	Diameter (outer)	41 mm
PPU size	Width	10 cm
	Height	10 cm

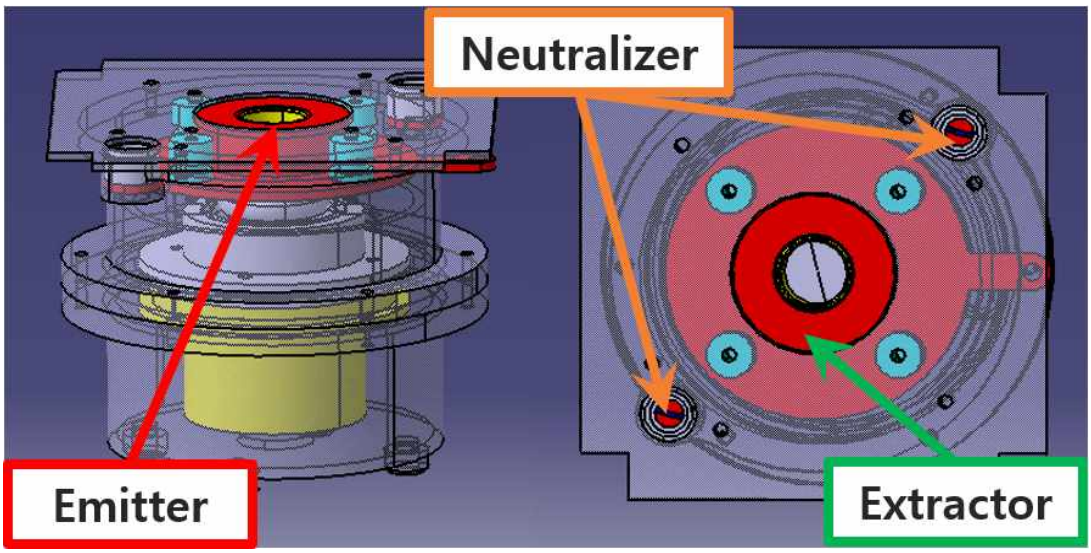


Fig. 4.4. Prototype design of FEEP thruster

4.3 방출기와 추력기 프로토타입 제작

방출기와 FEEP 추력기의 설계안을 바탕으로 Fig. 4.5와 4.6과 같이 방출기와 추력기의 프로토타입을 제작하였다.

Fig. 4.5. Annular slit emitter fabrication

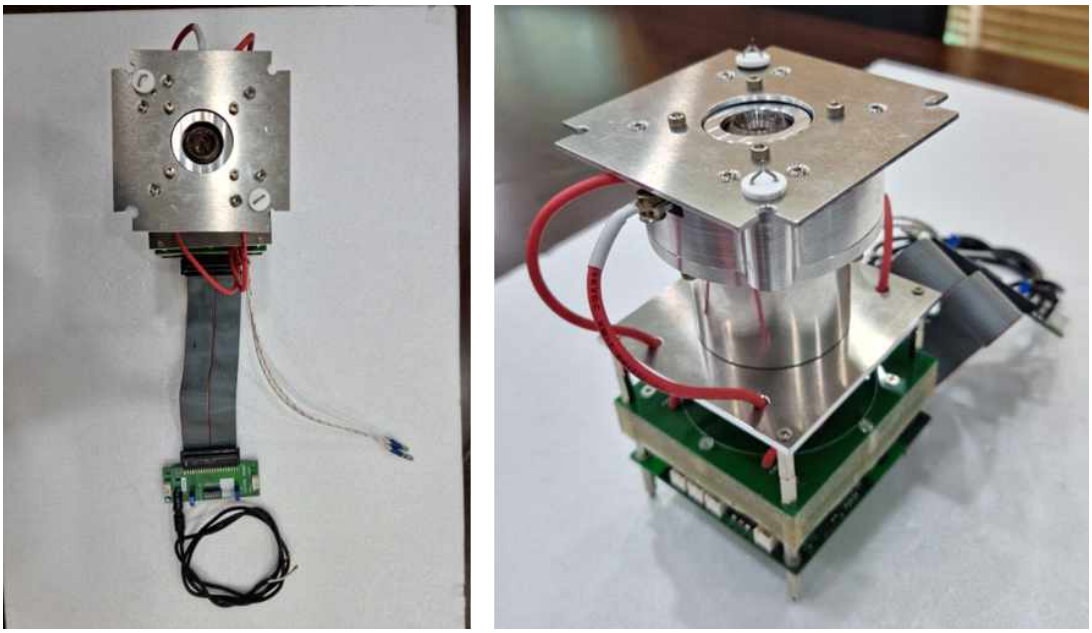


Fig. 4.6. FEEP thruster prototype fabrication

제 5 장 결 론

본 연구에서는 새로운 형태의 FEEP 추력기의 시스템 수준 설계를 진행하여 대략적인 프로토타입 설계안을 도출하였다. 시스템 해석을 통해 추력기를 설계하는데 있어서 가장 중요한 세 개의 변수를 도출하였으며, 선형 슬릿형 방출기와 원주형 슬릿형 방출기의 단면을 분석하여 유사성을 파악하였다. 이에 따라 선형 슬릿형 방출기에서 사용되는 경험식들을 바탕으로 수치 모델링을 진행하였으며, 세 개의 주요 변수들을 수치모델에 대입하여 최종 설계안인 슬릿의 길이는 5 cm, 방출기 전압은 2.5~5 kV, 전류 밀도는 0.3 mA/mm를 산출해 내었다. 시스템 해석 이후 테일러 콘 실험 및 실제 추력기 개발 시 시스템 수준 설계 결과를 목표로 설정하여 진행하였다.

다음으로 테일러 콘 실험을 통해 테일러 콘 형성 원리에 대한 물리적인 이해도를 높이게 되었으며 방출기의 형상과 액체들의 물성치에 따라 테일러 콘의 형상이 어떻게 형성되는지 파악하였다. 우선 액체들의 물성치 중, 표면장력의 경우 낮을수록 테일러 콘이 형성되는 전압이 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 슬릿형 방출기에서 물과 올리브유의 cone jet 생성 모습이 다르다는 것을 확인하였는데, 이는 점성이 높은 올리브유가 multi cones를 생성하는데 더욱 유리하다고 판단된다. 이와 같은 cone jet 형성 모습을 통해 방출기의 형상 중 multi cones를 생성할 수 있는 슬릿 형태가 더 높은 추력을 발생시키기에 더 적절하다는 것을 알게 되었다. 마지막으로 프로토타입에서 추진제로 사용할 인듐을 이용한 실험

을 수행하여 실제 슬릿형 방출기의 실현 가능성을 확인하였다. 추후 연구에서는 액체의 점성과 multi cones 생성에 관한 연구를 수행할 예정이다. 또한, 이온 전류를 측정할 수 있는 페러데이 컵을 활용하여 이온의 발산각 및 jet의 길이를 측정하는 실험을 수행 예정이다.

마지막으로 시스템 해석 결과를 바탕으로 FEEP 추력기의 프로토타입을 제작하여 실제 원주형 슬릿형 방출기를 제작하였다. 또한 슬릿형 방출기를 위한 프리웨팅 장치를 개발하였다. 해당 장치는 슬릿형 방출기를 가진 추력기 제작 시 단순한 물리적인 방식으로 프리웨팅이 가능하여 저렴한 비용으로 제작이 가능하다고 판단된다. 추후 연구에서는 추력기의 Engineering Model (EM)을 개발하고, 추력 측정을 위한 성능측정장비를 개발하여 EM의 추력 측정을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Bharti, M. K. and Chalia, S., “Literature Study of Field Emission Electric Propulsion Microthruster,” *International Research journal of Engineering and Technology,* Vol. 4, No. 5, 2017, pp. 2777-2781.

[2] Lemmer, L., “Propulsion for CubeSats,” *Acta Astronautica,* Vol. 134, 2017, pp. 231-243.

[3] Bock, D., Bethge, M. and Tajmar., “Highly Miniaturized FEEP Thrusters for CubeSat Applications,” *Proceedings of the 4th Spacecraft Propulsion Conference*, Cologne, Germany, 2014.

[4] Taylor, G. I., “Disintegration of Water Drops in an Electric Field,” *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 280, No. 1382, 1964, pp. 383-397.

[5] Badami, M. A., “Design of a FEEP Thruster for Micro-/Nano-Satellites,” *M.S. Thesis, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Lulea University of Technology,* 2019.

[6] Rayleigh, L., “XX. On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charges with Electricity,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 14, No. 87, 1882, pp. 184-186.

[7] Zeleny, J., “Instability of Electified Liquid Surface,” *Physical*

review, Vol. 10, No. 1, 1917, p. 1.

[8] Gan, Y. H., Jiang, Z. G., Li, H. G., Luo, Y. L., Chen, X. W., Shi, Y. L., Yan, Y. Y. and Yan, Y. F., "A Comparative Study on Droplet Characteristics and Specific Charge of Ethanol in Two Small-Scale Electrospray Systems," *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 1, 2019, pp. 1-12.

[9] Park, J., Lee, B. J. and Jeung, I, S., "Survey on Research and Development of Field Emission Electric Propulsion Thrusters," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 25, No. 5, 2022, pp. 36-52.

[10] Mitterauer, J., "Indium: An Alternative Propellant for FEEP-Thrusters," *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 2001, p. 3792.

[11] Tajmar, M., Genovese, A., Buldrini, N. and Steiger, W., "Miniaturized Indium-FEEP Multiemitter Design and Performance," *Nano Tech 2022-"At the Edge of Revolusion"*, 2002, p. 5718.

[12] Schönherr, T., Little, B., Krejci, D. and Reissner, A., "Development, Production, and Testing of the IFM Nano FEEP Thruster," *36th International Electric Propulsion Conference*, September 2019, pp. 1-11.

[13] Enpulsion - Market leader in propulsion technology,. https://www.enpulsion.com/.

[14] Scharlemann, C., Buldrini, N., Killinger, R., Jentsch, M., Polli, A.,

Ceruti, L., DiCara, D. and Nicolini, D., "Qualifciation Test Series of the Indium Needle FEEP Micro-Propulsion System for LISA Pathfinder," *Acta Astronautica,* Vol. 69, No. 9-10, 2011, pp. 822-832.

[15] Valentian, D. R., Bartoli, C. M., Pfeffer, H. A., Rohden, H. J. H. V. and Stewart, D. "Field-Emission Ion Source and Ion Thruster Apparatus Comprising Such Sources," *Untied State Patent*, 1982.

[16] Gulczinski III, F. S., Schilling, J. H., Hall, C. D. and Woodward, J, R., "Powersail High Power Propulsion System Design Study," *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 2001, p. 3346.

[17] Nijdam, S., Teunissen, J. and Ebert, U., "The Physics of Streamer Discharge Phenomena," *Plasma Source Science and Technology*, Vol. 29, No. 10, 2020, p. 103001

[18] Mitterauer, J., "Emission Performance of a Slit Type Ceasium Field Ion Source," *Journal de Physique Colloques*, Vol. 50, No. 8, 1989, pp.191-196.

[19] Mühlich, N. S., Seifert, B. and Aumayr, F., "IFM Nano Thruster Performance Studied by Experiments and Numerical Simulations," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, No. 9, 2020. p. 095203.

[20] Smith, D. P., "The Electrohydrodynamic Atomization of Liquids," *IEEE Transactions on Industry Applications,* Vol. 3, No.3, 1986, pp. 527-535.

[21] Lozano, P. and Martinez-Sanchez, M., "Ionic Liquid Ion Sources:

Characterization of Externally Wetted Emitters," *Journal of colloid and interface science,* Vol. 282, No. 2, 2005, pp. 415-421.

Abstract

Development of FEEP Electric Propulsion for Nano-Satellite

Chanearl Kwon

Interdisciplinary Program in Space Systems

The Graduate School

Seoul National University

Field emission electric propulsion (FEEP) is deemed the most suitable ion thruster for nano-satellite's deep space exploration and precision maneuver due to its low thrust and high specific thrust. Research on annular slit has never been carried out except for some conceptual patents, which can offer high space efficiency, and zero ion beam lost at the end of the slit. Therefore, it is important to set a design target value through system analysis for the present research. Here, voltage, slit length of emitter, and current per slit length for maximum thrust and minimum power are calculated via system analysis as a basic level of development. To understand the basic principle for the actual development, taylor cone experiment

utilizing various types of emitters, ionic liquid ion source (ILIS) was conducted. In addition, ionization experiment using liquid metal ion source (LMIS) was carried out. The results elucidate that multi-cones can be formed from ILIS, which is experimentally accessible, and confirmed the possibility of multi-cones formation at the annular slit. The work in progress is extended to LMIS with annular slit, where ionization occurred from liquid indium, which confirmed the possibility of a working annular slit type emitter. Finally, prototype of annular slit emitter and FEEP thruster was developed based on the system analysis results.

keywords : FEEP Thruster, Field Emission, System Analysis, Taylor Cone, Liquid Metal Ionization, Annular Slit Type Emitter, Pre-Wetting Device

Student Number : 2021-25164