

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.1.001>

MEMS 추력기를 위한 마이크로 점화기의 제작 방법 및 성능 평가

이종광^{a,*}

Fabrication Method and Performance Evaluation of Micro Igniter for MEMS Thruster

Jongkwang Lee^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: Jongkwang@hanbat.ac.kr

ABSTRACT

Micro igniter on the glass membrane for MEMS thruster was developed. The stability of the micro igniter by using a glass membrane with a thickness of tens of microns was improved. The micro igniter was fabricated by anisotropic wet etching of photosensitive glass and deposition of Pt/Ti for electric heat coil. The solid propellant was loaded into the propellant chamber without an especial technique due to the high structural stability of the glass membrane. Ignition tests were performed successfully. The minimum ignition delay was 27.5 ms with an ignition energy of 19.3 mJ.

초 록

MEMS 추력기를 위한 유리 박막 마이크로 점화기를 개발하였다. 수십 마이크로 미터의 두께를 가지는 유리 박막을 사용하여 점화기의 구조적 안정성을 향상시켰다. 마이크로 점화기는 박막 형성을 위한 감광 유리의 이방성 식각과 점화 코일 형성을 위한 Pt/Ti 증착 공정으로 제작되었다. 개발된 점화기는 유리 박막의 구조적 안정성으로 인하여 특별한 장치없이 추진제 충전이 가능하였다. 점화 실험이 성공적으로 이뤄졌으며 최소 점화 지연은 27.5 ms, 최소 점화 에너지는 19.3 mJ 이었다.

Key Words: MEMS Thruster(MEMS 추력기), Micro Igniter(마이크로 점화기), Solid Propellant(고체 추진제), Ignition Characteristic(점화 특성)

1. 서 론

마이크로/나노 위성체의 개발과 함께 위성체의 자세 제어 및 궤도 수정을 위한 MEMS 추진 시스템의 개발이 필요하게 되었다. MEMS 추진 시스템의 개념들로는 이원 추진제 추력기, 단일 추진제 추력기 그리고 고체 추진제 추력기 등이

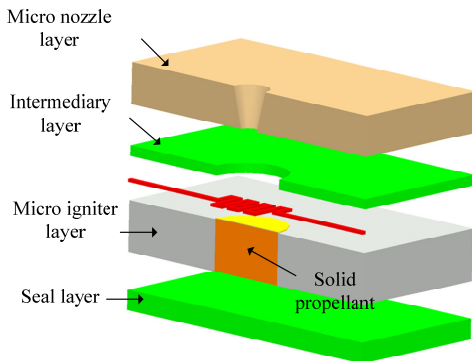


Fig. 1 Schematic of MEMS thruster.

있다. 이 중 MEMS 고체 추진제 추력기는 움직이는 부품이 없어 구조가 단순하고 상대적으로 제작이 용이하다는 장점으로 여러 연구 그룹들에 의하여 연구가 진행되고 있다[1-3]. Fig. 1은 이 연구에서 개발하려 하는 MEMS 고체 추진제 추력기의 개념도이다. 추력기는 마이크로 노즐층, 중간층, 마이크로 점화기층 그리고 바닥층으로 구성되어 있으며, 추진제는 lead styphnate가 사용되었다. 이 논문에서는 고체 추진제 점화를 위한 마이크로 점화기에 대한 연구 결과를 보고하려 한다.

마이크로 점화기는 줄열을 이용하는 마이크로 히터로서 MEMS 추력기의 점화기뿐 아니라 마이크로 시스템에서 마이크로 열원 및 센서로 그 응용이 가능하여 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 마이크로 점화기의 개발에 있어서 고려해야 할 사항은 낮은 소비 전력, 빠른 응답 특성, 구조적 안정성 등이다. 일반적으로 많이 사용되는 마이크로 점화기는 유전체 박막(dielectric membrane) 위에 다결정 실리콘(polysilicon) 혹은 금속을 패터닝(patterning)한 점화기이다[4-5]. Rossi 등은 기존의 P+ 실리콘 박막을 이용한 마이크로 점화기가 기계적 강도는 상대적으로 우수하지만 높은 열전도로 과도한 열손실이 발생하는 것을 확인하고, 이를 보완하기 위해 유전체 박막을 사용한 마이크로 점화기를 연구하였다. SiO₂, SiO₂/Polysiliconoxide, SiO₂/Si₃N₄ 등의 다양한 유전체 박막의 경우에 대해 해석을 수행하여, 점화기의 기하학적 형상보다는 박막의 물질

특성이 점화기 성능에 더욱 지배적인 요인이라 밝혔다. 또한 추진제 점화에 필요한 최소 점화 전력이 있음을 언급하며, 최소 점화 전력 이상의 전력에서는 점화 지연 시간이 지수승으로 감소한다 하였다[6-7]. 유전체 박막을 사용한 점화기의 경우 낮은 소비 전력과 빠른 시간 응답 특성을 장점으로 가진다. 하지만 수 마이크로 이하의 얇은 유전체 박막으로 인하여 추진제 충전에 많은 어려움이 있으며, 사용 환경이 제한적이라는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 이유로 Zhang 등은 550 μm 두께의 파이렉스(Pyrex) 유리 웨이퍼에 마이크로 점화기를 제작하여 사용하였다. 하지만 두꺼운 유리 기판으로 높은 소비 전력을 가지게 되며, 시간 응답 특성 역시 좋지 않았다 [8]. Tanaka 등은 점화기와 추진제의 접촉 문제로 인한 점화 실패 가능성을 차단하기 위해 비 접촉식 마이크로 점화기를 개발하였다. B/Ti의 화학 반응으로부터 나오는 고온의 플라즈마를 이용하여 추진제를 점화하려 시도하였으나, 결국 접촉식 마이크로 점화기가 더 적합한 성능을 가진다는 결론을 내렸다[9].

이 연구에서는 기존의 마이크로 점화기들의 단점을 보완하며 보다 안정적인 점화기를 개발하기 수십 마이크로 미터의 유리 박막을 가지는 유리 박막 마이크로 점화기를 개발하였다. 유리 박막 마이크로 점화기는 수십 마이크로의 박막 두께로 인하여 유리 기판 마이크로 점화기에 비해 낮은 전력 소비를 가지며, 유전체 박막 마이크로 점화기에 비해서는 높은 구조적 안정성을 가진다.

2. 유리 박막 마이크로 점화기의 제작

2.1 마이크로 점화기의 설계 변수

마이크로 점화기 제작 시 고려해야 할 중요한 설계 변수는 저항으로 사용될 물질과 저항의 형상 그리고 저항이 제작될 박막이다.

저항은 온도 변화에 높은 안정성을 가지며 대기 중에서 산화가 거의 발생되지 않아 성능 변화가 없는 백금을 택하였다[10]. 저항의 형상은

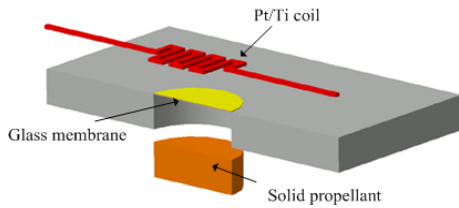


Fig. 2 Detail components of micro igniter.

패턴 길이대 면적비가 커서 열적 특성을 우수하게 할 수 있는 미로형(meander) 타입으로 결정하였다.

박막은 점화 코일을 지지하고 추진제를 외부로부터 보호하는 역할을 하며, 마이크로 점화기의 성능에 있어 가장 중요한 요소이다. 박막은 점화 코일로부터 추진제로의 열전달 특성을 좋게 하기 위해서는 가능한 얇게 만드는 것이 좋으나 고체 추진제 충전을 위해서는 박막이 일정 수준 이상의 구조적 안정성을 가져야 하기 때문에 너무 얇은 두께를 가져서도 안 된다. 또한 추진제 점화 후 빠른 시간 안에 박막이 깨져서 챔버 내부에 높은 압력이 걸리지 않게 해야 하기 때문에 너무 두꺼운 박막의 사용 역시 적합하지 않다. 일반적으로 마이크로 점화기에는 발열 특성을 좋게 하기 위하여 주로 수 μm 두께의 유전체 박막이 사용되어 왔다. 하지만 이는 위의 사항들을 고려하여 선택된 두께가 아니라 기존의 일반적인 MEMS 공정으로 제작되는 박막의 제작상의 한계로 선택되는 두께이다. 유전체 박막의 경우는 제작 공정에서 발생하는 높은 잔류 응력으로 인하여 수 μm 이상의 박막을 가질 수 없다. 이처럼 얇은 박막은 열전달 특성이 우수하기 때문에 발열 특성은 우수하나 구조적 안정성이 떨어지기 때문에 추진제 충전과 점화기의 사용 시 많은 어려움이 있다.

이 연구에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 수십 μm 의 박막을 개발하였다. 수십 μm 의 박막은 기존의 실리콘 기반의 MEMS 공정이 아닌 감광 유리를 사용하여 제작되었다. Fig. 2는 유리 박막 마이크로 점화기의 개략도이다. 제안된 마이크로 점화기의 성능을 기존의 점화기들과 명확히 비교하기 위하여 Fig. 3과 같은

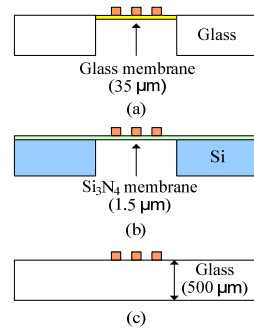


Fig. 3 3 Types of micro igniter.

유전체 박막 점화기와 유리 기판 점화기를 같이 제작하여 성능을 비교 평가 하였다.

2.2 마이크로 점화기의 제작 공정

유리 박막 마이크로 점화기는 박막 형성을 위한 감광 유리 식각(etching) 공정과 백금 저항 제작을 위한 박리(lift-off) 공정을 통해 제작되었다.

Fig. 4는 점화기의 제작 공정도이다. 유리 박막을 형성하기 위한 준비 단계로 우선 박막을 형성할 영역의 감광 유리에 310 nm 파장의 UV를 노광을 한다. 이후 감광 유리를 열처리하여 박막이 형성될 영역을 재결정화한다(a~c). 재결정화 과정의 거치면 고온의 노(furnace)에 노출된 감광 유리의 표면은 매우 거칠게 되어 패턴닝 작업이 힘들게 된다. 이와 같은 이유로 열처리 작업 이후, 감광 유리를 CMP(Chemical & Mechanical Polishing) 작업을 하여 표면을 매끄럽게 한다. 이후 감광 유리 기판의 앞면에 감광제의 리소그래피(photolithographic process) 공정을 통하여 점화기가 형성될 면의 감광제를 제거한다(d). 이후 스퍼터(sputter)를 사용하여 백금층의 접착력을 위한 티타늄(Ti)을 200 Å 증착하고, 백금(Pt)을 2000 Å 증착하면 기판 표면은 선택적으로 백금/티타늄 층과 백금/티타늄/감광제 층이 존재하게 된다(e). 다음으로는 웨이퍼를 아세톤 용액으로 처리하면 백금/티타늄/감광제 층이 박리된다. 이 과정을 통해 점화기 형상으로 패턴된 영역에만 백금/티타늄 층이 남아있게 된다(f). 이후 백금 점화기가 형성된 앞면을 불산 희석 용액으로부터 보호하기 위하여 감광제를

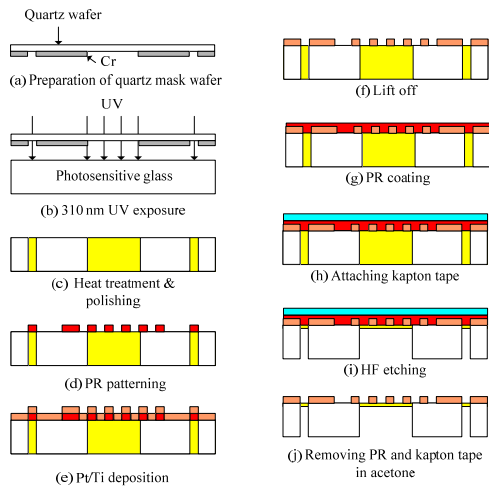


Fig. 4 Fabrication process of micro igniter on glass membrane.

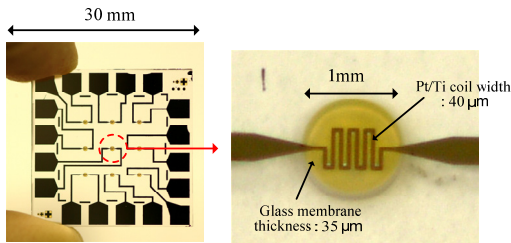


Fig. 5 Micro igniter on glass membrane.

입히고, 캡톤 테이프로 앞 면을 덮는다(g-h). 이와 같은 공정을 거친 후 감광 유리를 불산 희석 용액에 담그면 재결정화가 된 영역만 식각되게 된다. 식각 시간을 조절하여 유리 박막의 두께를 조절한다(i)[11]. 식각 작업이 끝난 후 앞면의 캡톤 테이프로 제거하고 이를 아세톤 용액에 넣어 감광제를 제거한다(j).

Fig 5는 제작된 유리 박막 마이크로 점화기의 사진이다. 박막의 지름은 1 mm이며, Pt의 선폭은 40 μm , Pt의 발열 영역은 520 $\mu\text{m} \times 440 \mu\text{m}$ 이다. 제작된 유리 박막의 두께는 알파 스텝(DEKTAK8, I&A Tech Inc.)을 이용하여 측정하였다. 측정된 유리 박막의 평균 두께는 35 μm 였으며, 사용된 웨이퍼의 두께는 500 μm 였다.

유전체 박막 점화기는 질산화 실리콘 박막 마이크로 점화기로 실리콘 기판을 이용하여 제작

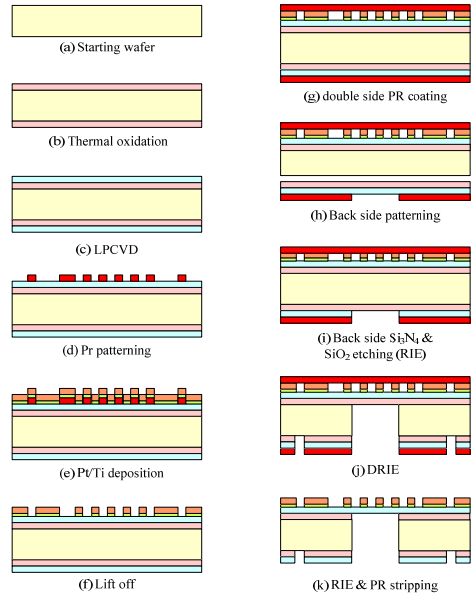


Fig. 6 Fabrication process of micro igniter on dielectric membrane.

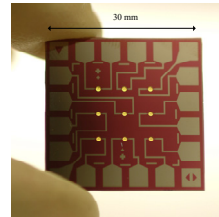


Fig. 7 Micro igniter on dielectric membrane.

하였다. 제작 공정도는 Fig. 6에 제시되어 있으며 자세한 제작 공정은 다음과 같다.

먼저 박막 형성을 위한 준비 단계로 노를 사용하여 실리콘 기판 위에 이산화 실리콘(SiO_2)을 0.5 μm 증착한 후(b), 저압 화학기상증착(LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 질산화 실리콘(SiN_x)을 1.5 μm 증착한다(c). 이후, 실리콘 기판에 감광제를 입힌다. 다음으로는 감광제의 리소그래피 공정을 통하여 점화기가 형성될 면의 감광제를 제거한다(d). 이후 스퍼터를 사용하여 백금 층의 접착력을 위한 티타늄을 200 \AA 증착하고, 백금을 2000 \AA 증착하면 실리콘 기판 표면은 선택적으로 백금/티타늄 층과 백금/티타늄/감광제 층이 존재하게 된

다(e). 다음으로는 웨이퍼를 아세톤 용액으로 처리하면 백금/티타늄/감광제 층이 박리된다(f). 이 과정을 통해 점화기 형상으로 패터닝된 영역에만 백금/티타늄 층이 남아있게 된다. 다음으로 박막 형성을 위하여 기판의 뒷 면에 감광제 리소그래피 공정을 한다. 이 공정은 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 공정의 마스크 작업으로서 박막이 형성될 영역은 감광제 없는 상태로 하고, 그 외의 영역은 감광제로 기판이 보호되게 한다(h). RIE 공정을 통해 감광제로 보호되지 않은 영역의 이산화 실리콘과 질산화 실리콘을 제거한다(i). 이후에는 DRIE 공정을 통하여 실리콘을 건식 식각하고(j), 다시 RIE 공정을 통하여 이산화 실리콘을 제거한다(k). 이와 같은 공정을 거치게 되면 최종적으로 질산화 실리콘 박막만 존재하며 질산화 실리콘 마이크로 백금 점화기가 완성되게 된다. Fig. 7은 완성된 질산화 실리콘 박막 마이크로 점화기이다.

유리 기판 점화기의 경우 유리 박막 점화기와 같은 물성을 지닌 상태에서 비교하기 위하여 유리 박막 점화기와 같은 방법으로 제작하되, 불산 식각 공정만을 제외하고 제작하였다.

3. 마이크로 점화기 성능 평가

마이크로 점화기의 성능 평가에 있어서 중요한

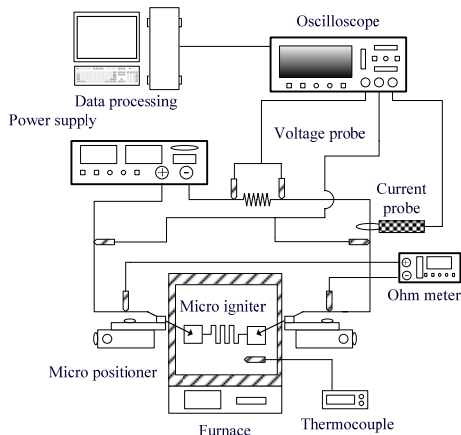


Fig. 8 Experimental setup for heating characteristics.

척도는 인가 전력에 대한 발열 특성, 박막의 구조적 안정성, 점화 성능이다. 이 연구에는 실험을 통하여 마이크로 점화기의 특성을 평가하였다.

3.1 마이크로 점화기의 발열 특성

Fig. 8은 발열 특성을 확인하기 위한 실험 장치의 개략도이며, 성능 평가 과정은 다음과 같다.

마이크로 점화기의 인가 전력에 대한 발열 온도는 노에서 온도 변화를 주며 측정된 저항 변화 값과 인가 전력에 따라 변화하는 저항 값을 이용하여 간접적으로 주어진 전력에 대한 점화기의 온도 변화를 추산하는 방법을 사용하였다 [12]. Fig. 9는 유리 박막 점화기의 온도 및 전력

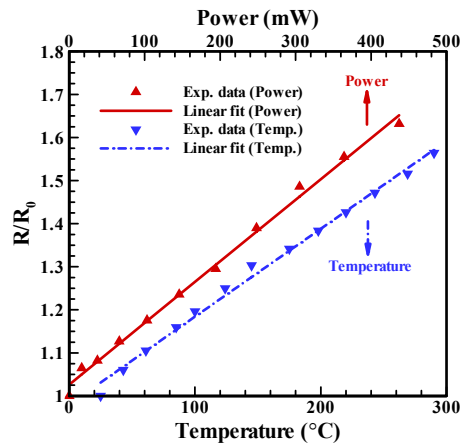


Fig. 9 Resistance variations as a function of temperature and power.

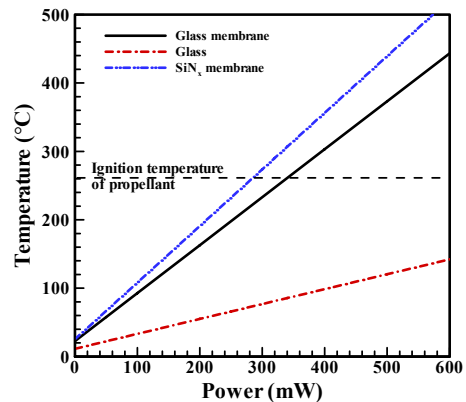


Fig. 10 Temperature as a function of power.

에 따른 저항 변화이다. 실험값으로부터 선형적합(linear fitting)된 1차 함수들을 이용하여 Fig. 10과 같이 각각의 점화기들에 대하여 인가 전력에 따른 발열 온도를 추산하였다. 기폭제의 한 종류인 lead styphnate의 점화 온도인 260°C을 얻기 위해서는 유리 박막 점화기의 경우는 340 mW, 유전체 박막 점화기의 경우는 285 mW, 유리 기판 점화기의 경우는 1150 mW의 인가 전력이 필요하였다. 이 연구에서 제안한 유리 박막 마이크로 점화기는 일반적으로 사용되는 유전체 박막 점화기에 비해 약 20% 발열 특성이 낮게 나타났으나 유리 기판 점화기에 비해서는 약 4배 높게 나타났다.

3.2 마이크로 점화기 박막의 구조적 안정성

마이크로 점화기의 성능에 있어 또 하나의 중요한 것은 점화기 박막의 구조적 안정성이다. 일반적으로 유전체 박막 점화기의 경우, 박막 제작시 존재하는 잔류 응력으로 인하여 박막의 두께가 수 μm 이하로 제작되어야 한다. 얇은 박막의 두께로 인하여 박막의 구조적 안정성이 떨어지게 되며 사용에 많은 어려움이 있다. 또한 이 같은 얇은 박막은 추진제 충전이 매우 어렵기 때문에 별도의 추진제 충전 설비를 갖춰야 한다 [13]. 이 연구에서는 이 같은 사항을 고려하여 수십 μm 두께의 유리 박막을 제작하였다.

박막의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 박막의 파괴 압력을 측정하였다. 파괴 압력을 측정하기 위해서는 박막에 일정 압력을 가해줄 수 있는 실험 장치가 필요한데 이 연구에서는 Fig. 11과 같은 실험 장치를 고안하여 박막의 파괴 압력을 측정하였다. Fig. 12는 박막의 두께에 따른 파괴 압력 결과이다. 두께가 1.5 μm 인 유전체

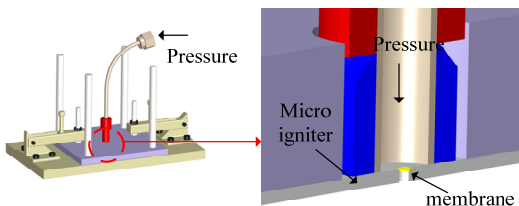


Fig. 11 Experimental setup for fracture pressure.

박막의 경우는 약 500 kPa에서 박막이 파괴되었으며, 35 μm 의 두께를 가진 유리 박막의 경우는 약 1500 kPa의 압력에서 박막이 파괴되었다. 이상의 결과로 이 연구에서 제안한 유리 박막 점화기가 기존의 유전체 박막의 점화기보다 구조적 안정성이 3배 이상 높은 것을 확인하였다.

3.3 마이크로 점화기의 성능 평가

유리 박막 마이크로 점화기의 점화 성능을 확인하기 위하여 lead styphnate를 충전한 후 점화 성능을 평가하였다.

Fig. 13은 lead styphnate의 인가 전압 별로 시간에 따른 공급 전력이고 Table 1은 점화 특성 결과이다.

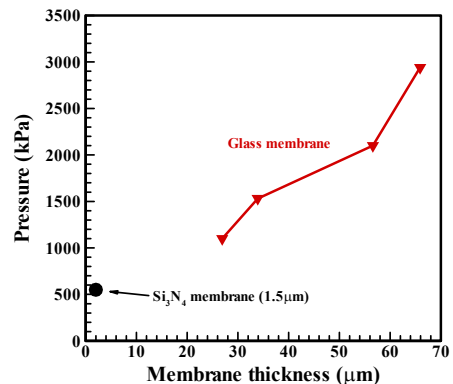


Fig. 12 Fracture pressure as a function of membrane thickness.

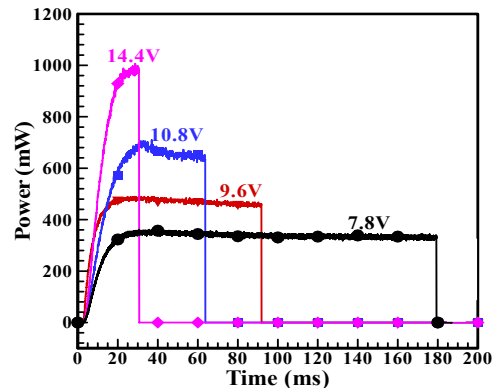


Fig. 13 Ignition power and input voltage of micro igniter with lead styphnate.

Table 1. Ignition characteristics.

Voltage (V)	Ignition Energy (mJ)	Ignition delay (ms)
7.8	57.2	176
9.6	40	88.8
10.8	34.3	60.6
14.4	19.3	27.5

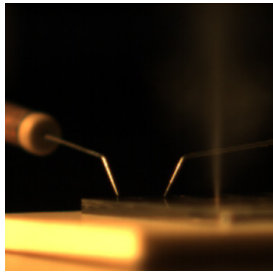


Fig. 14 Ignition test.

일반적으로 알려져 있는 lead styphnate의 점화 온도인 260°C 를 달성하기 위하여 마이크로 점화기에 공급되어야 할 전압은 약 7.8 V이고 이때의 점화 에너지는 57 mJ, 점화 지연은 176 ms 이었다. 하지만 이보다 높은 전압을 인가한다면 점화 에너지와 점화 지연은 Fig. 13의 결과처럼 줄일 수 있다. 이 연구에서 측정된 가장 낮은 점화 에너지는 19.3 mJ 이었으며 이때의 점화 지연은 27.5 ms, 인가 전압은 14.4 V였다. 14.4 V보다 높은 전압에서는 점화 코일이 파손되며 점화를 할 수 없었다. Fig. 14는 점화 실험 사진이다.

4. 결 론

이 연구에서는 MEMS 고체 추진제 추력기의 핵심 부품인 마이크로 점화기를 개발하였다. 마이크로 점화기는 기존의 유전체 박막 점화기의 장점을 유지하며, 단점인 기계적 특성을 보완하기 위하여 유리 박막을 사용하였다.

유전체 박막의 경우 제작 상에서 발생하는 잔류 응력으로 인하여 수 μm 미만의 얇은 두께를

가지게 된다. 이 경우 발열 특성은 좋아지나 너무 얇은 박막으로 인하여 사용에 있어서도 많은 주의를 기울려야 하며, 실제 추진제 충전에 있어 많은 어려움이 있기 때문에 별도의 기술 내지는 추진제 충전 장비가 필요하게 된다. 이에 반해 이 연구에서 제안하고 개발된 유리 박막 마이크로 점화기의 경우 잔류 응력 문제로부터 자유롭기 때문에 수십에서 수백 μm 의 두께를 가지는 박막을 가질 수 있다. 이 연구에서는 제작 공정에 있어 재현성이 보장되는 35 μm 두께의 유리 박막을 사용하였다.

제작된 유리 박막 점화기의 경우 발열 특성이 유전체 박막 점화기에 비해 약 20% 성능이 감소되기는 하였지만, 박막의 기계적 특성인 박막 파괴 압력은 3배로 증가하였다. 이 같은 특성이 이 연구에서 유전체 박막 점화기에 비해 발열 특성이 다소 떨어지나 유리 박막 점화기를 제안하고 개발한 이유이다. 개선된 점화기의 구조적 안정성으로 인해 개발된 점화기에 추진제를 충전할 경우 어떠한 특별한 기술 내지는 장치 없이 손쉽게 추진제를 충전할 수 있었다.

점화기의 점화 성능 평가 결과 인가 전압이 14.4 V 일때, 최소 점화 에너지 19.3 mJ, 그리고 최소 점화 지연 27.5 ms을 얻을 수 있었다. 또한 점화 지연과 점화 에너지가 인가 전압이 증가함에 따라 지수승으로 감소되는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

References

- Lewis Jr., D.H., Janson, S.W., Cohen, R.B. and Antonsson, E.K., "Digital Micro Propulsion," *Sensors and Actuators A*, Vol. 80, No. 2, pp. 143-154, 2000.
- Rossi, C., Larangot, B., Lagrange D. and

- Chaalane, A., "Final Characterization of MEMS-based Pyrotechnical Microthrusters," *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, No. 2, pp. 508-514, 2005.
3. Lee, J. and Kwon, S., "Design, Fabrication and Testing of Planar Type of Micro Solid Propellant Thruster," *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 77-84, 2006.
 4. Gajda, M.A. and Ahmed, H., "Applications of Thermal Silicon Sensors on Membranes," *Sensors and Actuators A*, Vol. 49, No. 1-2, pp. 1-9, 1995.
 5. Rossi, C. and Estève, D., "Micropyrotechnics, a New Technology for Making Energetic Microsystems : Review and Prospective," *Sensors and Actuators A*, Vol. 120, No. 2, pp. 297-310, 2005.
 6. Rossi, C., Scheid, E. and Esteve, D., "Theoretical and Experimental Study of Silicon Micromachined Microheater with Dielectric Stacked Membranes," *Sensors and Actuators A*, Vol. 63, No. 3, pp. 183-189, 1997.
 7. Rossi, C., Temple-Boyer, P. and Esteve, D., "Realization and Performance of Thin SiO₂/SiN_x Membrane for Micro Heater Applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 64, No. 3, pp. 241-245, 1998.
 8. Zhang, K.L., Chou, S.K. and Ang, S.S., "Fabrication, Modeling and Testing of a Thin Film Au/Ti Microheater," *Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 6, pp. 580-588, 2007.
 9. Tanaka, S., Kondo, K., Habu, H., Itoh, A., Watanabe, M., Hori, K. and Esashi, M., "Test of B/Ti Multilayer Reactive Igniter for a Micro Solid Rocket Array Thruster," *Sensors and Actuators A*, Vol. 144, No. 2, pp. 887-890, 2008.
 10. Baroncini, M., Placidi, P., Scorzoni, A., Cardinali, G. C., Dori, L. and Nicoletti, S., "Characterization of an Embedded Microheater for Gas Sensors Application," *Proceeding on the international symposium on VLSI technology*, pp. 164-167, 2001.
 11. Dietrich, T.R., Abraham, M., Diebel, J., Lacher, M. and Ruf, A., "Photoetchable Glass for Microsystems: Tips for Atomic Force Microscopy," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 187-189, 1993.
 12. Rossi, C., Esteve, D. and Mingues, C., "Pyrotechnic Actuators: a New Generation of Si Integrated Actuator," *Sensors and Actuators A*, Vol. 74, No. 1-3, pp. 211-215, 1999.
 13. Rossi, C. Briand, D., Dumonteuil, M., Camps, T., Pham, P.Q. and Rooij, N.F., "Matrix of 10 × 10 Addressed Solid Propellant Microthrusters: Review of the Technologies," *Sensors and Actuators A*, Vol. 126, No. 1, pp. 241-252, 2006.