마이크로 고체 추진제 추력기 점화를 위한 유리 박막 마이크로 점화기
Micro igniter on glass membrane for the ignition of a micro solid propellant thruster

이종광 권세진
Jongkwang Lee Sejin Kwon
한국과학기술원 항공우주공학과
(발표자 연락처 : chaosage@kaist.ac.kr)

ABSTRACT This paper presents the development of a micro Pt heater on glass membrane for the ignition of a micro solid propellant thruster. Pt was adopted for the resistive heater material considering high stability in high temperature cycle and resistance to oxidation and corrosion. The fabrication process on photosensitive glass substrate was used to make glass membrane. The thickness and diameter of the membrane were 35 ㎛ and 1 mm, respectively. The width of Pt pattern was 40 ㎛. A key characteristic in the performance of micro heater is a temperature response to given electric power. The comparison of the performance between the micro Pt igniters on 35 ㎛ thick glass membrane and 450 ㎛ thick glass substrate was carried out. The power consumption of glass membrane was about 70% less than that of glass substrate for the same temperature. Ignition test was performed with the pellet of HTPB/AP solid propellant. A constant voltage pulse was applied and the successful ignition of propellant was observed.

Keyword : Micro igniter, Micro solid propellant thruster

1. 서 론

마이크로/나노 위성체의 개발과 함께 위성체의 자세 제어 및 궤도 수정을 위한 마이크로 추진 시스템의 개발이 필요하게 되었다. 마이크로 추진 시스템의 개념들로는 마이크로 이중 추진제 추력기, 단일 추진제 추력기 그리고 고체 추진제 추력기 등이 있다. 이 중 마이크로 고체 추진제 추력기는 움직이는 부품이 없고, 구조가 단순하여 상대적으로 제작이 용이하다는 장점이 있어 미국 캘리포니아 공과대학교, 프랑스 국립 과학 연구소, 싱가폴 국립 대학교, 일본의 동북 대학교 그리고 국내에서는 KAIST 에서 다양한 연구들이 진행 중이다(1~5). 그림 1 은 KAIST 에서 개발을 목표로 하고 있는 마이크로 고체 추진제 추력기의 개념도이다. 추력기의 요소로는 마이크로 노즐, 마이크로 점화기, 마이크로 연소 챔버 그리고 고체 추진제이다. 이 논문에서는 고체 추진제 점화를 위한 마이크로 점화기에 대한 연구 결과를 기술하겠다.

마이크로 점화기는 줄열을 이용한 마이크로 히터로서 마이크로 추력기의 점화기뿐 아니라 마이크로 시스템에서 마이크로 열원 및 센서로 그 응용이 가능하여 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 마이크로 점화기의 개발에 있어서 고려해할 사항은 낮은 소비 전력, 빠른 응답 특성, 구조적 안정성, 높은 수율 등이다. 일반적으로 많이 사용되는 마이크로 점화기는 유전체 박막(dielectric membrane) 위에 다결정 실리콘(poly silicon) 혹은 금속을 패터닝(patterning)한 점화기이다. 유전체 박막을 사용한 점화기의 경우 낮은 소비 전력과 빠른 시간 응답 특성을 장점으로 가진다. 하지만 수 마이크로 이하의 얇은 유전체 박막은 사용 환경이 제한적이라는 단점을 가지고 있다. 이같은 이유로 Zhang 등은 550 ㎛ 두께의 파이렉스(pyrex) 유리 웨이퍼에 마이크로 점화기를 제작하여 사용하였다(3). 하지만 두꺼운 유리 기판으로 높은 소비 전력을 가지게 되며, 시간 응답 특성 또한 좋지 않다.

이 연구에서는 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, 유전제 박막 마이크로 점화기에 비해서는 높은 구조적 안정성과 열손실이 적은 장점이 있다.

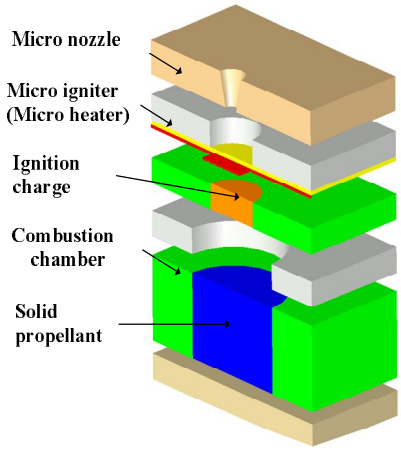

그림 1 마이크로 고체 추진제 추력기 개념도

2. 마이크로 점화기의 제작 공정

마이크로 점화기의 제작에 있어 중요한 설계 변수들은 점화기에서 저항으로 사용될 물질, 저항의 형상, 점화기가 제작되는 박막의 물성이다. 이 연구에서는 저항으로 온도 변화에 높은 안정성을 가지며, 대기 중에서 산화 현상이 잘 발생하지 않아 성능 변화가 거의 없는 없는 백금을 선택하였다. 저항의 형상은 패턴 길이 대 단면적 비가 커서 열정 특성을 향상시킬 수 있는 미로형(meander) 타입으로 결정하였다. 박막은 열전도도가 낮고, 수십 마이크로 두께의 박막을 형성시킬 수 있는 유리 박막으로 선택하였다. 열전도도가 낮은 물성을 선택한 이유는 점화기에서 발생되는 열의 손실을 줄이기 위해서다.

유리 박막 마이크로 점화기는 감광 유리를 이용하여 제작된다. 자세한 공정도는 그림 2 에 제시되어 있으며, 유리 박막 마이크로 점화 장치의 제작 공정은 다음과 같다. 유리 박막을 형성하기 위한 준비 단계로 우선 박막을 형성할 영역의 감광 유리를 310 nm 파장의 UV 에 노광을 한다. 이후 감광 유리를 열처리하여 박막이 형성될 영역을 재결정화 한다. 재결정화 과정을 거치면 고온의 노(furnace)에 노출된 감광 유리의 표면은 매우 거칠게 되어 패터닝 작업이 힘들게 된다. 이와 같은 이유로 열처리 공정 이후, 표면처리를 하여 표면을 매끄럽게 한다. 이후 감광 유리 기판의 앞면에 감광제(PR, Photoresist)의 리소그래피(lithography) 공정을 통하여 점화기가 형성될 면의 감광제를 제거한다. 이후 스퍼터(sputter)를 사용하여 백금 층 접착력을 위한 티타늄을 200 Å 증착한 후, 백금을 2000 Å 증착하면 유리 기판 표면은 선택적으로 백금/티타늄 층과 백금/티타늄/감광제 층이 존재하게 된다. 다음으로는 웨이퍼를 아세톤 용액으로 처리하면 백금/티타늄/감광제 층이 박리된다. 이 과정을 통해 점화기 형상으로 패턴된 영역에만 백금/티타늄 층이 남아있게 된다. 이후 백금 점화기가 형성된 앞면을 불산(HF) 희석 용액으로부터 보호하기 위하

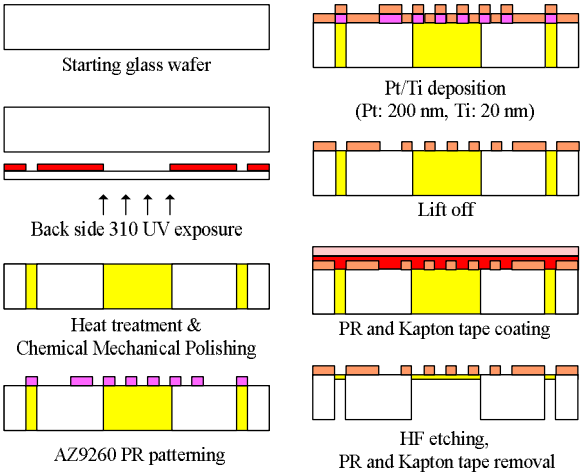

그림 2 유리 박막 마이크로 점화기의 제작 공정도

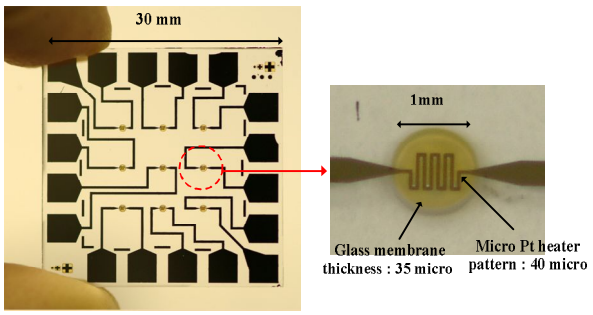

그림 3 유리 박막 마이크로 점화기

여 감광제를 입히고, 캡톤 테이프로 앞 면을 덮는다. 이와 같은 공정을 거친 후 감광 유리를 불산 희석 용액에 담그면 재결정화가 된 영역만 식각되게 된다. 식각 시간을 조절하여 유리 박막의 두께를 조절한다. 식각 작업이 끝난 후 앞면의 캡톤 테이프를 제거하고 이를 아세톤 용액에 넣어 감광제를 제거하게 된다. 그림 3 은 제작된 유리 박막 마이크로 백금 점화기의 사진이며, 제작된 마이크로 점화기의 유리 박막의 두께는 35 ㎛, 박막의 지름은 1 mm 이며, 백금 패턴의 폭은 40 ㎛ 이다.

3. 마이크로 점화기의 성능 평가

마이크로 점화기의 성능 평가에 있어서 중요한 척도는 인가 전력에 대한 발열 온도이다. 인가 전력에 대한 발열 온도의 평가는 고온으로 환경 변화가 가능한 노에서 온도 변화를 주며 구한 저항 변화 값과 인가 전력에 따른 저항 변화 값으로부터 간접적으로 주어진 전력에 대한 온도 변화를 추산하는 방법을 사용하였다. 식 (1), (2), (3)은 이 관계를 보여 주고 있다.

$$R = R_0(1 + TCR \times T) \quad (1)$$

$$R = R_0(1 + PCR \times P) \quad (2)$$

$$T = \frac{PCR}{TCR} \times P + \alpha \qquad (3)$$

온도에 대한 저항 계수인 TCR(Temperature Coefficient of Resistance)과 인가 전력에 대한 저항 계수인 PCR(Power Coefficient of Resistance)을 그림 4 와 5 와 같이 실험 결과를 선형적합(linear fitting)하여 구한다. 선형적합을 통해 얻어진 PCR 과 TCR 을 이용하여 식 (3)과 같이 인가 전력과 점화기의 발열 온도의 관계를 구한다. 이와 같은 방법을 이용하여 유리 박막 마이크로 점화기와 유리 기판 마이크로 점화기의 성능 평가를 수행하였다

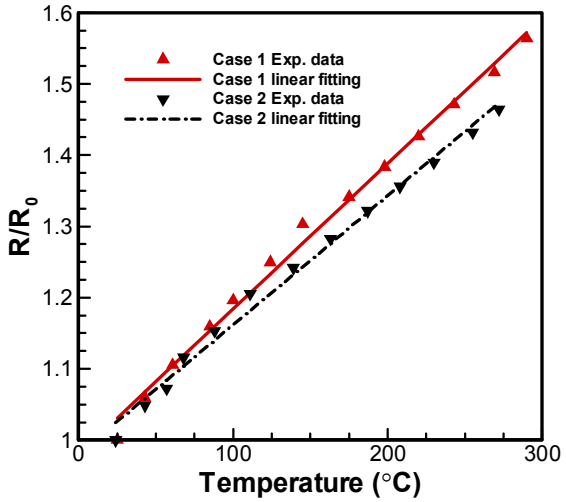

그림 5 온도에 따른 저항비(Case 1: 유리 박막 마이크로 점화기, Case 2: 유리 기판 마이크로 점화기)

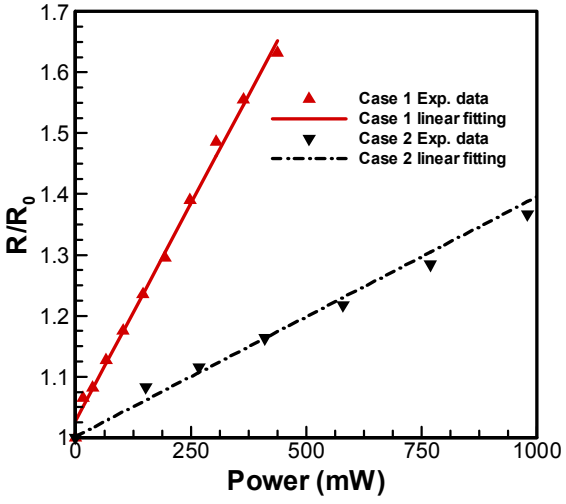

그림 6 인가 전력에 따른 저항비

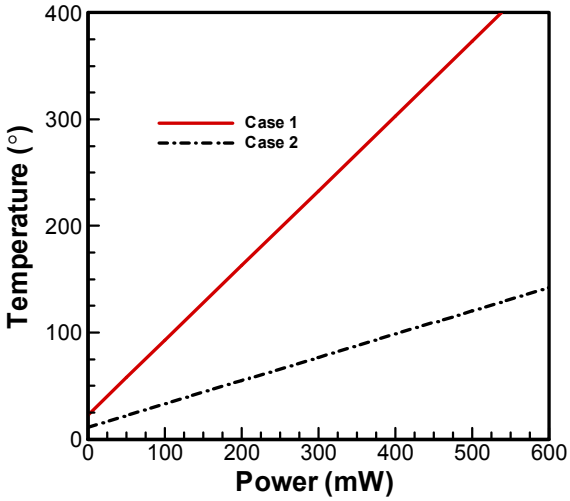

그림 7 인가 전력에 따른 온도

그림 5 는 온도에 따른 저항 변화를 보여주며, 그림 6 은 인가 전력에 따른 저항 변화를 보여주고 있다. 온도에 따른 저항 변화는 두 경우에서 큰 차이를 가지지 않았다. 이는 두 경우가 같은 형상의 점화기 패턴을 가지

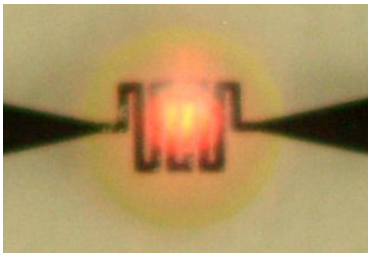

그림 8 열점이 형성된 마이크로 점화기 (전압: 7.43 V, 전력: 364 mW)

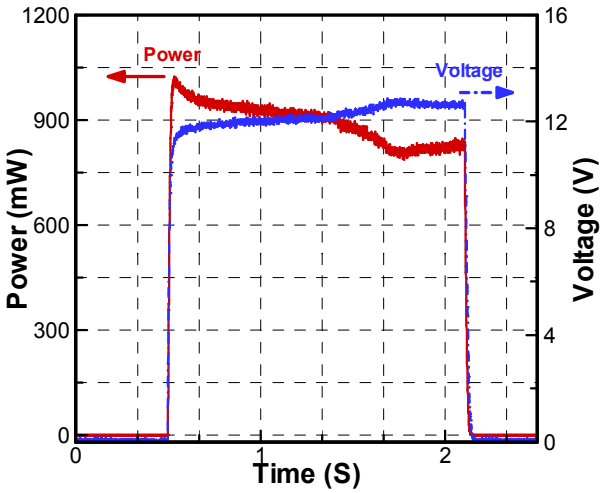

그림 9 추진제 점화를 위해 공급된 인가 전력과 전압

고 있으며, 온도에 따른 저항 변화를 측정할 때 점화기의 온도가 정상 상태로 도달한 후에 측정하였기 때문이다. 즉 시간에 대한 측면이 고려되지 않는다면 온도에 따른 점화기의 특성은 박막의 두께에 크게 영향을

받지 않는다. 하지만 인가 전력에 대한 저항 변화는 두 경우가 매우 다른 경향을 가지게 된다. 이는 박막을 형성하지 않았을 경우 발생하는 열손실로 인한 결과이다. 그림 7 에서는 온도에 대한 저항 특성과 인가 전력에 대한 저항 특성을 선형적합한 결과를 이용하여 인가 전력에 대한 마이크로 점화기의 발열 온도 관계를 구한 결과이다. 박막을 형성하지 않은 경우에는 열손실로 인하여 같은 인가 전력을 공급하더라도 유리 박막 점화기에 비하여 30% 정도의 발열 온도를 가졌다. 그림 8 은 유리 박막 마이크로 점화기에 364 mW 의 인가 전력을 공급되었을 시, 마이크로 점화기의 사진이다. 점화기의 중앙을 중심으로 열점이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

유리 박막 마이크로 점화기의 점화 실험을 수행하였다. HTPB(Hydroxyl Terminated PolyButadiene)/AP(A mmonium Perchlorate) 추진제를 지름 1mm 크기의 펠릿(pellet)로 제작하여 점화 실험에 사용하였다. 그림 9 는 점화 실험 시 공급된 전압과 전력이다. 점화 지연은 1.6 s 로 측정되었으며, 점화 에너지는 1.4 J 이였다. 그림 10 은 점화 실험 사진이다.

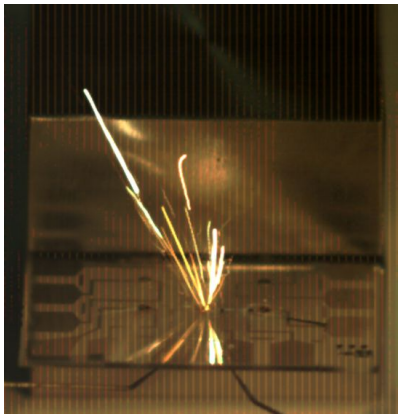

그림 10 고체 추진제 점화 실험

4. 결론 및 향후 계획

마이크로 고체 추진제 추력기의 핵심 기술인 점화 장치에 대한 연구를 다음과 같이 수행하였다. 기존의 마이크로 점화 장치들의 장점을 취합하고, 단점들은 보완할 수 있는 새로운 개념의 유리 박막 마이크로 점화기의 개념을 고안하고 제작 공정을 확립하였다. 박막의 두께가 35 ㎛, 지름은 1 mm 인 박막을 형성하고, 백금을 패터닝하여 점화기를 제작하였다. HTPB/AP 고체 추진제 점화 실험을 성공적으로 수행하였다. 하지만 점화 지연 시간이 1 s 이상으로 길었는데 이는 추진제와 점화기의 접촉이 좋지 않았기 때문이라 판단된다. 향후 추진제과 점화기의 접촉 문제에 대한 연구를 진행하며, 마이크로 점화기의 성능 최적화 연구를 수행할 예정이다.

후기

이 연구는 방위 사업청 지정 국방 MEMS 특화 센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Lewis, D., H., Janson, S., W., Cohen, R., B., Antonson, E., K., 1999, "Digital Micro Propulsion," *Proceeding of 12th IEEE international micro electro mechanical systems*, pp.517-522.

[2] Rossi, C., Larangot, B., Lagrange D., Chaalane, A., 2005, "Final characterizations of MEMS-based pyrotechnical micro thrusters," *Sensors and actuators A*, Vol. 121, pp.508-514.

[3] Zhang, K.L., Chou, S.K., Ang, S.S., Tang, X.S., 2005, "A MEMS-based solid propellant micro thruster with Au/Ti igniter," *Sensors and actuators A*, Vol. 122, pp.113-123.

[4] Kondo, K., Tanaka, S., Habu, H., Tokudome, S., Hori, K., Saito, H., Itoh, A., Watanabe, M., Esashi, M., 2004, "Vacuum test of a micro-solid propellant rocket array thruster," *IEICE*, Vol. 1, No. 8, pp.222-227.

[5] 이종광, 양준서, 권세진, 2007, ”고체 추진제 내탄도 해석을 이용한 마이크로 펄스 추력기의 설계 및 제작 방법,” *KMEMS 07*, pp.402 -405.