

저전력소비, 고출력, 연발형 마이크로 분사기의 설계, 제작 및 성능 시험

김상욱, 강태구, 조영호

Design, Fabrication and Performance Testing of a High-impulse, Low-Power Microthruster using Liquid Propellant with High Viscous Fluid Plug

Sang Wook Kim, Tae Goo Kang, Young-Ho Cho

Key Words: Microthruster(마이크로분사기), Microinjector(마이크로인젝터), Continuous-Shot(연속발사), Digital injection(디지털 분사)

Abstract

A high-impulse, low-power, continuous-shot microthruster has been developed using low boiling temperature liquid-propellant with high viscous fluid-plug. The viscous friction force of the fluid-plug increases the blast pressure and the low boiling temperature liquid-propellant is intended to reduce input power consumption. The three-layer microthruster has been fabricated by surface micromachining as well as bulk micromachining in the size of $7 \times 13 \times 1.5 \text{mm}^3$. A continuous output impulse bit of $6.4 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$ has been obtained from the fabricated microthruster using perfluoro normal hexane (FC72) propellant and oil plug, resulting in about ten times increase of the impulse bit using one hundredth electrical input energy compared to the conventional continuous microthruster.

1. 서론

최근 MEMS 기술이 발달함에 따라 특히 고점도 유체분사나 극미세 유체제어를 위한 마이크로 분사기(microthruster)⁽¹⁻⁶⁾에 대한 관심이 증대되고 있다. 1~20kg의 마이크로위성(microsatellite)의 자세제어용 마이크로 분사기는 고출력 특성(Table 1)이 요구되고 있다.

최근 X. Ye 등⁽²⁾에 의해 제안된 연속 발사 형태(continuous-shot)의 마이크로 분사기는 팽창제(propellant)로서 물을 사용하였고, 48W의 입력 에너지(input energy)를 가지고 단발 분사 시 $6.6 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{sec}$ 의 충격량을 발생시켰다. 또다른 형태의 마이크로 인공위성 자세제어용 고출력 마이크로 분사기⁽³⁾(Table 2)는 팽창제로서 고체(납)를 사용하여, 100W의 입력 에너지를 가지고 단발분사 시 $1 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec}$ 의 충격량을 얻었으나, 이는 연속 발사 형태가 아닌 단발 모드(single-shot mode)로 작동되었다.

Table 1. Specifications of the microthrusters for the attitude control of microspacecraft⁽¹⁾

Mass of microspacecraft [kg]	Impulse bit [N · sec]	Thrust [mN]
20	1.3×10^{-2}	4.65
10	5×10^{-6}	1.75
1	7×10^{-7}	0.06

Table 2. Conventional MEMS-based microthrusters

Propellant	Liquid ⁽²⁾	Solid ⁽³⁾
Input power	48 W	100 W
Impulse bit	$6.6 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{sec}$	$1 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec}$
Ejection mode	Continuous shot	Single shot

이에 본 논문에서는 저온 비등 유체(low boiling temperature liquid)를 사용함으로써 입력에너지를 줄이고, 고점성 유체 마개(high viscous fluid plug)의 점성력을 이용하여 분사 시 팽창유체의 압력

한국과학기술원 디지털나노구동연구단
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실
Tel: 042-869-3078, Fax: 042-869-3050
E-mail: mems@kaist.ac.kr

을 극대화하여 보다 큰 충격량을 발생시킬 수 있는 연속 발사 형태의 새로운 고출력 마이크로 분사기를 제안하고 그 실현 가능성을 실험적으로 검증한다.

2. 작동 원리

Fig. 1은 작동원리를 설명하기 위한 마이크로 분사기의 단면도이다. 먼저 미세열선(micro heater)에 전기적 입력신호를 Fig. 1(a)의 초기 상태에서 가하면, 팽창유체(liquid-propellant)는 버블(bubble)을 형성하여 압력을 증가시키게 되고, 이때 고점성 유체 마개의 높은 점성 마찰력(viscous friction force)으로 인해 분사 직전(Fig. 1(b))까지 팽창유체의 압력을 극대화 할 수 있다. 즉, 고점성 유체마개의 역할은 팽창유체의 압력이 극대화 될 때까지 분사되지 않고 팽창유체의 압력에 저항하는 것이다. 유체마개의 저항력보다 팽창유체의 압력이 더 커져 유체마개가 분사되고 나면,

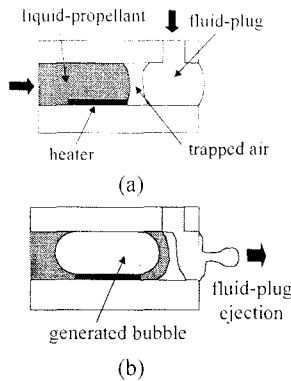


Fig. 1. Working principle of the microthrustor using low boiling temperature liquid-propellant with high-viscous fluid-plug; (a) the propellant and plug before ejection; (b) the propellant and plug at ejection

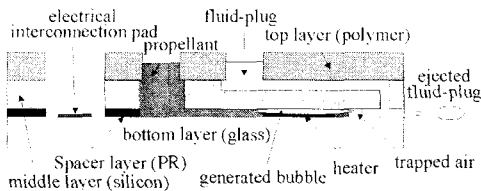


Fig. 2. Cross-sectional view of the microthrustor

팽창유체와 유체 마개는 각각의 표면 장력(surface tension force)에 의해 초기상태(Fig. 1(a))로 공급된다.

3. 제조 공정

본 마이크로분사기는 3층(Fig. 3)으로 구성되어 있고, Fig. 2는 마이크로 분사기의 단면을 나타낸다. 이의 제작을 위해서 먼저 표면미세가공법(surface micromachining)을 이용하여 하부 유리판 위에 미세열선과 전기도선(electrical interconnection), 팽창유체 채널을 각각 제작한 후, ICP RIE 공정을 이용하여 중간 실리콘판에 유체 마개 채널 및 유체 주입구를 형성하였고, 전선(wire) 통로 및 유체 주입구가 제작된 상부 폴리머판과 결합하여 마이크로 분사기를 완성하였다.

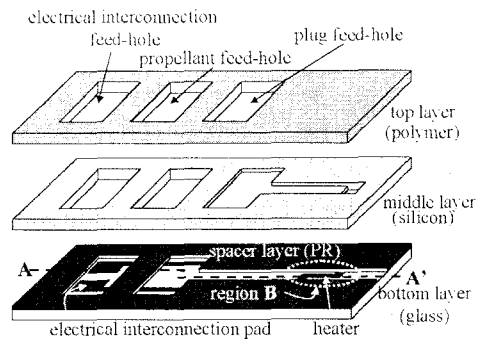


Fig. 3. Perspective view of the microthrustor layers

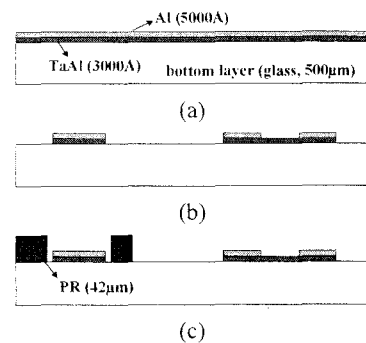


Fig. 4. Fabrication process for the bottom layer of microthrustor, showing the cross-section along A-A' in Fig. 3: (a) Al/TaAl sputtering; (b) Al/TaAl patterning; (c) thick PR molding

Fig. 4는 하부 유리판(bottom glass layer)의 미세 열선과 전기도선 및 팽창유체 채널을 형성하는 제조 공정을 도시한 것이다. 먼저, 미세열선층(TaAl)과 전기도선층(Al)을 각각 1000Å, 5000Å 두께로 증착(Fig. 4(a)) 한 후 TaAl etchant(HNO₃: H₂O:HF=100:40:20)와 Al 식각용액에서 식각한 후, 추가적인 사진작업(photolithography)과 Al 식각작업(etching process)을 수행하여 폭 20 μ m, 길이 170 μ m의 미세열선을 Fig. 4(b)와 같이 제작한다. 마지막으로 40 μ m 두께의 PR 몰드(mold)를 사용하여 Fig. 4(c)와 같은 팽창유체 채널을 형성하였다. Fig. 5는 제작된 하부 유리판의 열선과 전기도선 및 채널을 위에서 본 사진이다.

한편, 중간 실리콘판(middle silicon layer)에 PR 식각보호막(etching mask layer)을 이용한 ICP RIE 공정으로 50 μ m 길이의 유체마개 채널을 형성하였고, 또한 5 μ m 두께의 TEOS 식각보호막을 이용한 ICP RIE 공정을 통해 중간 실리콘판을 관통하는 전선통로 및 유체 주입구를 형성하였다. 마지막으로 40 μ m 두께의 필름 접착제(SHUR Tape)를 사용하여 전선통로 및 유체 주입구가 제작된 상부

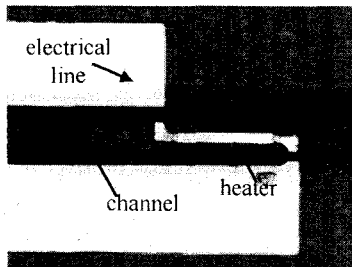


Fig. 5. Top view of the region B in Fig. 3

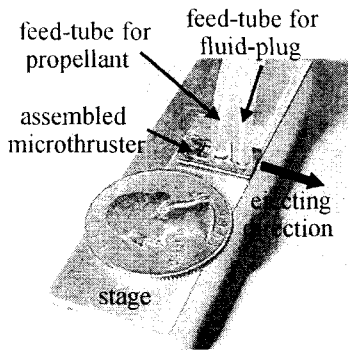


Fig. 6. The fabricated microthruster, attached on the stage

폴리머판(top polymer layer)과 중간 실리콘판 및 하부 유리판을 결합함으로써 마이크로 분사기의 제작을 완성하였다. Fig. 6은 시험대위에 놓여져 있는 마이크로 분사기의 사진이며, 제작된 마이크로 분사기의 전체 크기는 7 \pm 0.25mm \times 13 \pm 0.25mm \times 1.5 \pm 0.25mm이다.

4. 시험 결과

Fig. 7은 제작된 마이크로분사기의 성능을 시험하기 위한 장치와 시험 방법을 설명하는 개념도(schematic diagram)이다. 마이크로분사기의 분사 출력(blasting impulse)을 시험적으로 구하기 위해서 미소 액적(droplet)의 분사된 길이와 크기를 측정하여 이로부터 분사된 미소 액적의 질량과 초기 분사 속도를 도출하는 방법을 사용하였다. 또한, 사각 펄스 형태의 전기적 입력 신호(square pulse signal)의 경우에 대해 분사에 필요한 최소 펄스폭(minimum pulse width)인 시작 펄스폭(turn-on pulse width)을 측정하였다.

Fig. 8은 서로 다른 팽창유체-유체마개 조합인 물-물, perfluoro normal hexane (FC72, C₆F₆)-기름 및 물-기름의 세 가지 경우에 대한 미소 액적의 분사 길이와 크기 측정치로부터 도출된 분사출력 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 앞서 언급한 세 가지 실험의 결과를 사용하여, 같은 팽창유체와 서로 다른 두 가지 종류의 유체마개를 사용한 시험 결과를 비교함으로써 유체마개의 점성 마찰 효과로 인한 분사 출력의 차이를 실험적으로 분석하였으며, 마찬가지로 같은 유체마개와 서로 다른 두 가지 종류의 팽창유체를 사용한 시험 결과를 비교함으로써 팽창유체의 끓는점(boiling point) 차이로 인한 입력에너지 차이를 실험적으로 분석하였다. Fig. 9는 앞서 언급한 세 가지 팽창유체-유체마개 조합을 사용한 분사시험에서 측정한 결과를 시작입력에너지(turn-on input

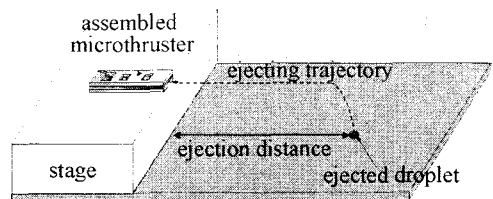


Fig. 7. Schematic diagram for the test

energy)와 분사충격량(output impulse bit)의 관계로 정리한 그래프이다.

먼저, 동일한 물을 팽창유체로 사용하면서, 유체마개를 물과 기름을 사용한 경우의 시험결과를 비교하여 보자. 두 가지 경우 모두 마이크로 분사기의 기하학적 치수와 형상이 동일할 뿐 아니라, $420 \pm 0.5 \Omega$ 의 저항을 가지는 미세열선에 동일한 전기적 입력 에너지인 3msec의 펄스폭(pulse width)을 가지는 13V, 7Hz의 사각파(square wave)를 인가하였다. Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이, 기름 유체마개를 사용한 경우의 분사충격량($6.4 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$)이 물 유체마개를 사용한 경우의 분사충격량($3.1 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$)에 비하여 2배 이상 큰 것으로 측정되었으며, 이는 기름 유체마개의 높은 점성 마찰력 때문인 것으로 추정된다. 반면, 시각 펄스폭의 경우에 있어서는 기름 유체마개의 경우와 물 유체마개의 경우에 있어서 각각 3msec와 $12 \mu\text{sec}$ 로 각각 측정되었으며(Fig. 9). 이는 기름 유체마개를 사용한 경우에 팽창유체의 분사압력(blasting pressure)이 기름의 높은 점성저항력을 이기고 분사될 때까지 증가하는 데 소요되는 시간이 물 유체마개를 사용한 경우보다 훨씬 길다는 것을 의미한다.

또한, 본 논문에서는 동일한 유체마개를 사용하고 팽창유체를 끓는점이 100°C 인 물과 59°C 인 FC72를 사용하는 마이크로 분사기의 성능을 측정하고 비교하였다. 앞서와 마찬가지로 다른 모든 조건은 동일하게 적용하였으며, 유체마개는 두 경우 모두 기름을 이용하여 실험하였다.

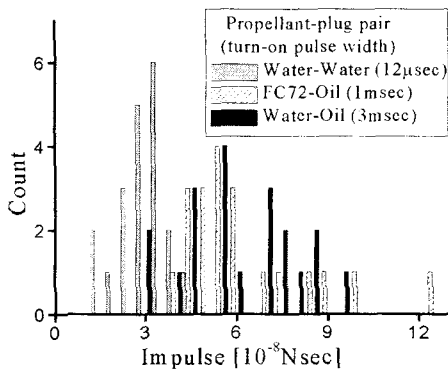


Fig. 8. Impulse distribution for three different propellant-plug pairs, when 7Hz square wave voltage of 13V is supplied to the microheater of $420 \pm 0.5 \Omega$

Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이, 두 가지 경우 모두 분사충격량은 거의 같은 값으로 측정되었으나(물 팽창유체의 경우: $6.4 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$, FC72 팽창유체의 경우: $6.2 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$), FC72를 팽창유체로 사용하는 경우는 물을 팽창유체로 사용한 경우에 비해 단위 분사출력(impulse bit)을 발생하는데 필요한 입력에너지가 1/3수준으로 측정되었다. 이로서 FC72를 팽창유체로 사용할 경우 물 팽창유체에 비해 끓는점이 낮음으로 인해 동일 팽창압력을 발생하는데 필요한 전기적 입력 에너지를 1/3 수준으로 감소시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 저온 비등 팽창유체와 고점성 유체마개를 이용하여 마이크로 인공위성의 자세 제어용 고출력, 저전력형 발열 저항식 마이크로 분사기를 설계, 제작하고 그 성능을 시험하였다. 제작된 마이크로 분사기로부터 비등점이 다른 2종의 팽창유체(물, FC72)와 점도가 다른 2종의 유체마개(물, 기름)를 사용하였을 때 각각의 미소 액적의 분사되어진 거리와 크기를 측정하였고, 그 값으로부터 마이크로 분사기의 분사충격량을 실험적으로 구하였다. 기름을 유체마개로 사용한 경우, 물을 유체마개로 사용한 경우의 약 2배인 $6.4 \times 10^{-8} \text{N} \cdot \text{sec}$ 의 분사충격량을 얻었으며, 또한, FC72를 팽창유체로 사용함으로써 분사에 필요한 입력에너지를 1/3 수준으로 줄였다.

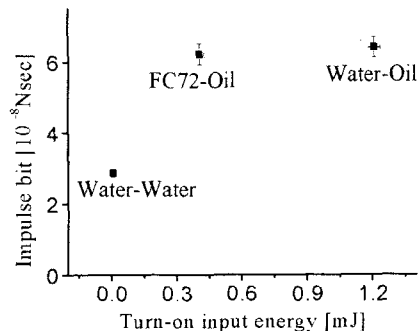


Fig. 9. Mean values of turn-on input energy and impulse output bit, for three different propellant-plug pairs, when 7Hz square wave voltage of 13V is supplied to the microheater of $420 \pm 0.5 \Omega$

따라서, 본 연구에서는 저온 비등 팽창유체인 FC72와 고점성 유체마개인 기름을 사용하는 새로운 형태의 마이크로 분사기의 개념을 제시하고, 이를 제작하여 그 분사 특성을 실험적으로 분석함으로써 인공위성의 자세제어에 필요한 고출력, 저전력형 언발형 마이크로 분사기로의 실현 가능성을 확인하였으며, 기존 유체분사기⁽²⁾에 비해 1/100의 입력 에너지로 10배의 출력을 발생시킬 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) J. Mueller, 1997, “Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of Existing Hardware and Emerging Technologies,” *AIAA*, Seattle, WA, USA, Paper 97-3058.
- (2) X. Ye, F. Tang, H. Ding and Z. Zhou, 2000, “A Vaporizing Water Micro-Thruster,” *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, Miyazaki, pp.74~79.
- (3) D. H. Lewis, Jr., S. W. Janson, R. B. Cohen and E. K. Antonsson, 1999, “Digital Micropropulsion,” *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, Orland, Florida, USA, pp.517~522.
- (4) A. Asai, T. HARA, and I.E. Franklin, 1987 “One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers,” *Japanese Journal of Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 10, pp.1794~1801.
- (5) Hirata, Y. Ishii, H. Matoba, and T. Inui, 1996. “An Inkjet Head Using Diaphragm Micro-actuator,” *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, San Diego, California, USA, pp. 418~423.
- (6) X. Zhu, E. Tran, W. Wang, E.S. Kim, and S.Y. Lee, 1996, “Micromachined Acoustic-Wave Liquid Ejector,” *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, pp.280~282.