

## 저온 비등 팽창유체와 고점성 유체마개를 이용한 고출력 저전력형 마이크로 분사기

김상욱\* · 강태구\* · 조영호†  
(2001년 11월 12일 접수, 2002년 3월 18일 심사완료)

### High-impulse, Low-Power Microthruster using Liquid Propellant with High-Viscosity Fluid Plug

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

**Key Words:** 마이크로추진기(Microthruster), 연속발사(Multiple-Injection), 팽창유체(Liquid Propellant), 유체마개(Fluid plug), 마이크로분사기(Microinjector)

#### Abstract

A high-impulse, low-power, digital microthruster has been developed using low-boiling-temperature liquid propellant with high-viscosity 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 digital output impulse bit of  $6.4 \times 10^{-6} \text{Nsec}$  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 multiple-shot microthruster.

#### 1. 서론

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

최근 X. Ye 등<sup>(2)</sup>에 의해 제안된 연속 발사 형태(multiple-injection)의 마이크로 분사기는 팽창제(propellant)로서 물을 사용하였고, 48W의 입력 에너지(input energy)를 사용하여 단발 분사 시  $6.6 \times 10^{-9} \text{Nsec}$ 의 충격량을 발생시켰다. 또다른 형태의 마이크로 인공위성 자세제어용 고출력 마이크로 분사기<sup>(3)</sup>(Table 2)는 팽창제로서 고체(납)를 사용하여, 100W의 입력 에너지를 사용하여 단발

분사 시  $1 \times 10^{-4} \text{Nsec}$ 의 충격량을 얻었으나, 이는 연속발사 형태가 아닌 단발 모드(single-shot mode)로 작동되었다.

이에 본 논문에서는 저온 비등 팽창유체(low-

**Table 1** Specifications of the microthrusters for the attitude control of microspacecraft<sup>(1)</sup>

| Mass of microspacecraft [kg] | Impulse bit [Nsec]   | Thrust [mN] |
|------------------------------|----------------------|-------------|
| 20                           | $1.3 \times 10^{-9}$ | 4.65        |
| 10                           | $5 \times 10^{-9}$   | 1.75        |
| 1                            | $7 \times 10^{-9}$   | 0.06        |

**Table 2** Conventional MEMS-based microthrusters

| Propellant    | Liquid <sup>(2)</sup>                          | Solid <sup>(3)</sup>                         |
|---------------|--|--|
| Input power   | 48 W   | 100 W  |
| Impulse bit   | $6.6 \times 10^{-9} \text{N} \cdot \text{sec}$ | $1 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec}$ |
| Ejection mode | Multiple shot                                  | Single shot                                  |

\* 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단

E-mail : dnc@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

boiling-temperature liquid propellant)를 사용함으로써 입력에너지를 줄이고, 고점성 유체 마개 (high-viscosity fluid plug)의 점성력을 이용하여 분사 시 팽창유체의 압력을 극대화하여 보다 큰 충격량을 발생시킬 수 있도록 하였으며, 또한 연속 발사가 가능하게끔 설계된 새로운 고출력 마이크로 분사기를 제안하고 그 실현 가능성을 실험적으로 검증한다.

### 2. 작동 원리

Fig. 1은 작동원리를 설명하기 위한 마이크로 분사기의 단면도이다. 먼저 미세열선 (microheater)에 전기적 입력신호를 Fig. 1(a)의 초기 상태에서 가하면, 팽창유체(liquid propellant)는 버블(bubble)을 형성하여 압력을 증가시키게 되고, 이 때 팽창유체 앞을 가로막고 있는 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, 팽창유체와 유체마개는 각각의 표면 장력(surface tension force)에 의해 초기상태(Fig. 1(a))로 공급된다.

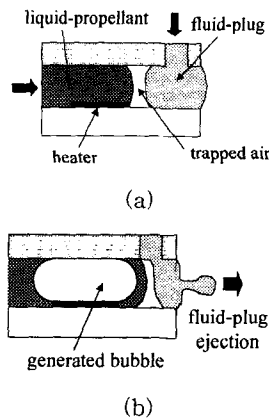


Fig. 1 Working principle of the microthruster; (a) the propellant and plug before ejection; (b) the propellant and plug at ejection

### 3. 제조 공정

본 논문에서 제안하는 마이크로분사기는 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 세 개의 층으로 구성되어 있으며, Fig. 3은 마이크로분사기의 단면도를 나타낸다. 이의 제작을 위해서 먼저 표면미세 가공법(surface micromachining)을 이용하여 하부 유리판 위에 미세열선(microheater)과 전기도선 (electrical interconnection), 팽창유체 채널을 각각 제작한 후, ICP RIE 공정을 이용하여 중간 실리콘판에 유체마개 채널 및 유체 주입구를 형성하였고, 전선(wire) 통로 및 유체 주입구가 제작된 상부 폴리머판과 결합하여 마이크로 분사기를 완성하였다.

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 1000 Å, 5000 Å 두께로 증착(Fig. 4(a)) 한 후 노광전사 공정 (photolithography)을 거쳐 TaAl 식각용액 (HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O:HF=100:40:20, 부피비)과 Al 식각용액에서 식각한 후, 추가적인 노광전사 공정과 Al 식각작업(etching process)을 수행하여 폭 20µm, 길

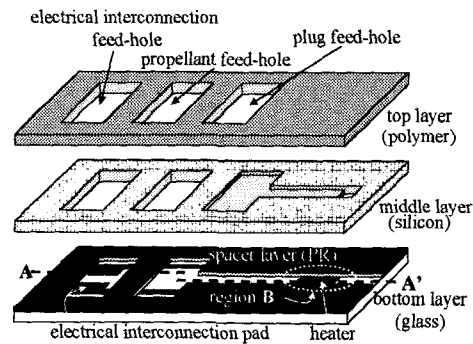


Fig. 2 Perspective view of the microthruster layers

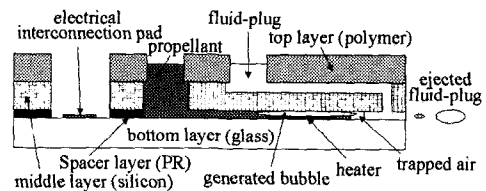


Fig. 3 Cross-sectional view of the microthruster

이 170 $\mu$ m의 미세열선과 전기도선을 Fig. 4(b)와 같이 제작한다. 마지막으로 40 $\mu$ m 두께의 감광제 몰드(PR mold)를 사용하여 Fig. 4(c)와 같은 팽창 유체 채널을 형성하였다. Fig. 5는 제작된 하부 유리판의 열선과 전기도선 및 팽창유체 채널을 위에서 본 사진이다.

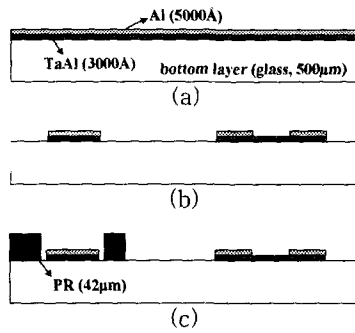


Fig. 4 Fabrication process for the bottom layer of microthruster, showing the cross-section along A-A in Fig. 3: (a) Al/TaAl sputtering; (b) Al/TaAl patterning; (c) thick PR molding

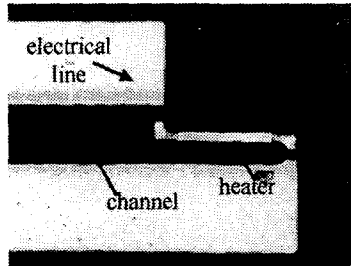


Fig. 5 Top view of the region B in Fig. 3

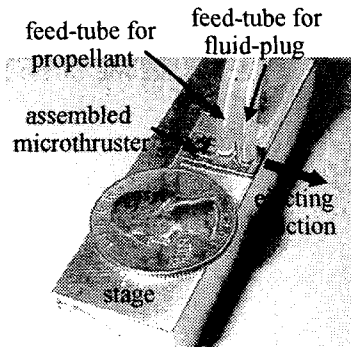


Fig. 6 The fabricated microthruster, attached on the stage

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

Fig. 7은 제작된 마이크로분사기의 성능 시험 장치와 시험 방법을 설명하고 있다. 마이크로분사기의 분사 출력(blasting impulse)을 시험적으로 구하기 위해서 미소 액적(droplet)의 분사된 거리와 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.

분사된 미소 액적의 크기로부터 미소 액적의 질량을 도출하기 위하여, 종이 위에 인쇄된 미소 액적의 형상을 반구의 형태로 가정하고 분사된 미소 액적의 크기를 계산하면 아래의 식 (1)과 같다.

$$V_d = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{3} r_p^3 \tag{1}$$

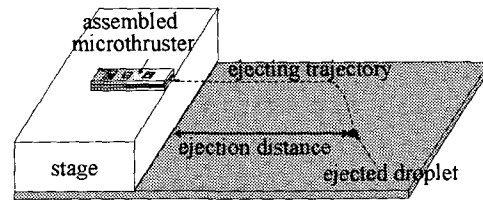


Fig. 7 Schematic diagram for the test

여기서  $V_d$ 는 분사된 미소 액적의 부피를 나타내고  $r_p$ 는 종이 위에 인쇄된 액적의 반지름을 나타낸다. 미소 액적의 질량은 식 (1)로부터 도출된 미소 액적의 부피에 유체의 밀도를 곱하여 도출할 수 있다.

또한, 미소 액적의 초기분사속도(initial ejection velocity)는 분사된 미소 액적의 분사거리를 측정함으로써 예측할 수 있다. 중력장에서 공기중에서 비행하는 구형 미소 액적의 비행궤도는 Stokes flow<sup>(5)</sup>에 의해 해석될 수 있으며, 수평방향 및 수직방향의 비행궤도  $X(t)$  및  $Y(t)$ 는 각각 아래와 같이 표시된다.

$$X(t) = \frac{U_{H0}m_d}{6\pi\mu r_d} \left\{ 1 - e^{-\frac{6\pi\mu r_d}{m_d}t} \right\} \quad (2)$$

$$Y(t) = U_{\infty} \left\{ t - \frac{U_{\infty}}{g} \right\} \left\{ 1 - e^{-\frac{6\pi\mu r_d}{m_d}t} \right\} \quad (3)$$

여기서  $r_d$ 와  $m_d$ 는 미소 액적의 반지름과 질량을 각각 나타내며,  $g$ 는 중력가속도(gravitational acceleration)를 나타내며,  $U_{\infty}$ 는 식 (4)와 같이 표현되는 종단속도(terminal velocity)를 나타낸다.

$$U_{\infty} = \frac{m_d g}{6\pi\mu r_d} \quad (4)$$

즉, 미소 액적이 분사된 거리를 측정하면 식 (2)와 (3)으로부터 미소 액적의 수평방향의 초기 분사속도인  $U_{H0}$ 를 도출해 낼 수 있다.

### 5. 시험 결과

본 논문에서는 마이크로분사기의 성능에 영향을 미치는 요소 중 팽창유체-유체마개 조합(propellant-plug pair)과 입력 펄스폭(input pulse width) 및 미소열선(microheater)의 크기가 마이크로분사기의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

#### 5.1 팽창유체-유체마개 조합의 효과

Fig. 8은 서로 다른 팽창유체-유체마개 조합인

물-물, perfluoro normal hexane (FC72,  $C_6F_6$ )-기름 및 물-기름의 세 가지 경우에 대한 미소 액적의 분사 거리와 크기 측정치로부터 도출된 분사출력 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 앞서 언급한 세 가지 팽창유체-유체마개 조합에 관한 실험결과를 바탕으로 같은 팽창유체와 서로 다른 두 가지 종류의 유체마개를 사용한 시험 결과를 비교함으로써 유체마개의 점성 마찰 효과로 인한 분사 출력의 차이를 실험적으로 분석하였으며,

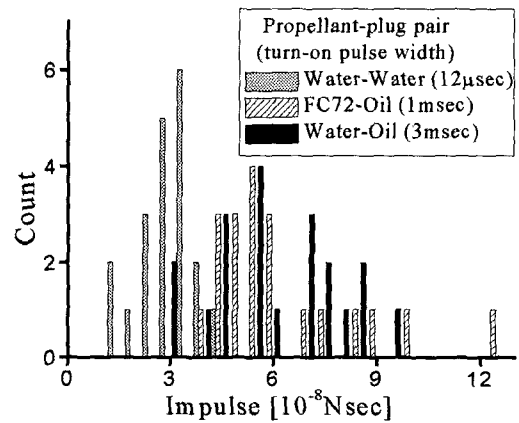


Fig. 8 Impulse distribution for three different propellant-plug pairs, when 7Hz square wave voltage of 13V is supplied to the microheater of  $420 \pm 0.5 \Omega$

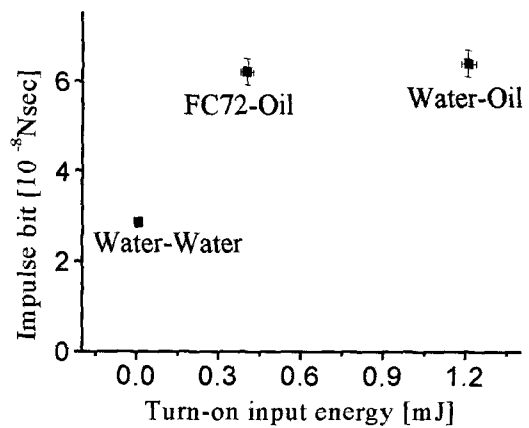


Fig. 9 Mean values of turn-on input energy and output impulse bit of the microthruster using three different propellant-plug pairs

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 측정된 결과를 시작 입력 에너지(turn-on input 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 유체마개의 높은 점성 마찰력에 의해 기름 유체마개를 사용한 경우의 분사충격량( $6.4 \times 10^{-8}$ Nsec)이 물 유체마개를 사용한 경우의 분사충격량( $3.1 \times 10^{-8}$ Nsec)에 비하여 2배 이상 큰 것으로 측정되었다. 반면, 시작 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 분사 압력(blasting pressure)이 기름의 높은 점성저항력을 이기고 분사될 때까지 증가하는 데 소요되는 에너지가 물 유체마개를 사용한 경우보다 훨씬 크다는 것을 의미한다.

또한, 본 논문에서는 기름을 유체마개로 사용하고 팽창유체를 끓는점이  $100^\circ\text{C}$ 인 물과  $59^\circ\text{C}$ 인 FC72를 사용하는 마이크로 분사기의 성능을 측정하고 비교하였다. Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이, 두 가지 경우 모두 분사충격량은 거의 같은 값으로 측정되었으나(물 팽창유체의 경우:  $6.4 \times 10^{-8}$ Nsec, FC72 팽창유체의 경우:  $6.2 \times 10^{-8}$ Nsec), 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.

## 5.2 입력 펄스폭의 효과

입력 펄스폭의 변화가 마이크로분사기의 성능에 미치는 효과를 실험적으로 분석하기 위하여, 본 논문에서는 물 팽창유체와 물 유체마개를 사용하는 마이크로분사기에 각각  $12 \mu\text{sec}$ (turn-on pulse width), 1msec 및 3msec의 펄스폭을 인가한 후 분사된 미소 액적의 반경과 분사거리를 측정하였다. 제작된 마이크로분사기의 시작펄스폭(turn-on pulse width)은 물-물의 팽창유체-유체마개 조합을 사용하는 경우에 있어서  $12 \mu\text{sec}$ 로 측정되었으며, 이 때 분사된 미소 액적의 분사충격량(impulse bit)은  $2.86 \pm 0.11 \times 10^{-8}$ Nsec로 나타났다. 또한, 같은 조건에서 펄스폭을 1msec와 3msec로 증가함에 따라 분사충격량은 각각  $2.55 \pm 0.12 \times 10^{-8}$ Nsec와  $3.14 \pm 0.14 \times 10^{-8}$ Nsec로 측정되었다. Fig. 10에 나타나 있는 바와 같이, 펄스폭을 시작펄스폭의 길이보다 더 길게 증가시켜도 분사충격량은 증가하지 않는데, 이는 시작펄스폭의 시간 내에 이미 미소 액적은 분사되므로 시작펄스폭 이후에 가해지는 추가적인 입력에너지는 유체마개의 분사에 사용되지 않기 때문이다.

## 5.3 미소열선의 크기 효과

미소열선의 크기가 마이크로분사기의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 미소열선의 폭은  $20 \pm 0.25 \mu\text{m}$ 로 서로 같지만, 미소열선의 길이가  $40 \pm 0.25 \mu\text{m}$ 와  $70 \pm 0.25 \mu\text{m}$  및  $320$

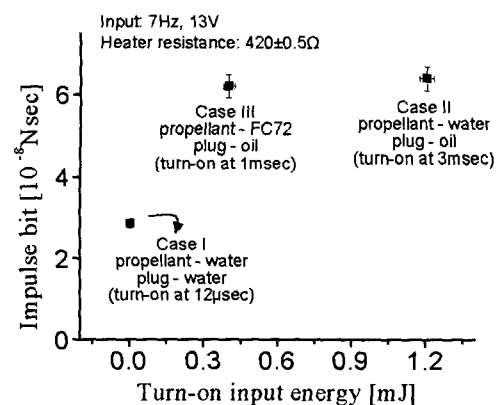


Fig. 10 Measured input energy and output impulse bit of the microthruster driven by three different input pulse width, using water propellant and water plug pair

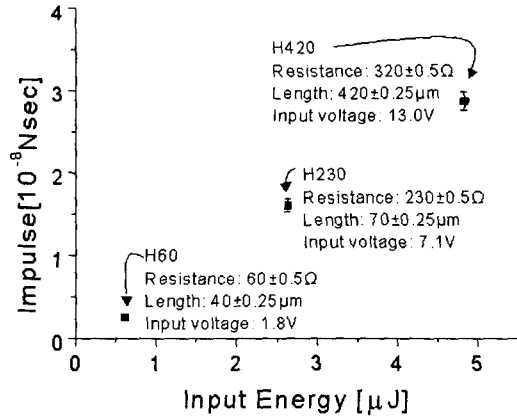


Fig. 11 Measured input energy and output impulse bit of the microthrusters using three different length of microheaters having an identical width of  $20 \pm 0.25 \mu\text{m}$ , while the microthrusters are driven by a fixed input power per unit heater volume,  $2.14 \times 10^{14} \text{W/m}^3$

$\pm 0.25 \mu\text{m}$ 로 서로 다른 마이크로분사기를 제작하여, 물-물의 팽창유체-유체마개 조합을 사용한 경우에 대하여 각각의 마이크로분사기에서 분사된 미소 액적의 반경과 분사거리를 측정하였다. 각각의 경우 미소열선의 전기적 저항값은 각각  $60 \pm 0.5 \Omega$ (H60)과  $230 \pm 0.5 \Omega$ (H230) 및  $420 \pm 0.5 \Omega$ (H420)으로 측정되었다. 각각의 미소 열선에 가해지는 단위 미소열선의 부피당 입력에너지를  $2.14 \times 10^{14} \text{W/m}^3$ 로 고정하였으며, 이 경우 H60에 가해지는 입력 전압은 1.8V이고, H230 및 H420의 경우는 각각 7.1V와 13V이며, 각각의 경우에 가해진 입력펄스폭은 모두  $12 \mu\text{sec}$ 였다. 이와 같이 단위 미소열선의 부피당 가해지는 입력에너지를 같도록 하는 것은 미소열선에서의 열적 상태가 같게 유지되도록 한 것이다.

Fig. 11에 나타나 있는 바와 같이, 미소열선의 크기가 증가함에 따라 마이크로분사기의 출력값인 충격량도 증가하였는데, 이는 미소열선의 크기가 증가함에 따라 미소열선의 열적 상태를 같게 유지하기 위해서 더 많은 입력에너지가 필요하지 되며, 이는 결국 미소열선이 더 큰 버블(bubble)을 발생시키게 되고, 발생된 버블의 크기가 클수록 분사되는 미소액적의 충격량도 커지게 되는 것이다.

## 6. 결론

본 논문에서는 저온 비등 팽창유체와 고점성 유체마개를 이용하여 마이크로 인공위성의 자세 제어용 연속발사형 고출력, 저전력형 발열 저항식 마이크로분사기를 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  $6.4 \times 10^{-8} \text{Nsec}$ 의 분사충격량을 얻었으며, 또한, FC72를 팽창유체로 사용함으로써 분사에 필요한 입력에너지를 1/3 수준으로 줄였다. 뿐만아니라, 발열 저항식의 마이크로분사기에 있어서 시작펄스폭 이후에 추가적으로 가해지는 입력에너지는 분사충격량에 영향을 미치지 않으며, 미소열선의 크기가 커짐에 따라 마이크로 분사기의 충격량도 증가한다는 것을 실험적으로 검증하였다.

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 연발형 마이크로 분사기의 실현 가능성을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

(1) Mueller, J., 1997, “Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of

- Existing Hardware and Emerging Technologies," *AIAA*, Seattle, WA, USA, Paper 97-3058.
- (2) Ye, X., Tang, F., Ding, H. and Zhou, Z., 2000, "A Vaporizing Water Micro-Thruster," *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, Miyazaki, January 23~27, pp. 74~79.
- (3) Lewis, D.H., Janson, S.W., Cohen, R.B. and Antonsson, E.K., 1999, "Digital Micropropulsion," *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, Orland, Florida, USA, pp. 517~522.
- (4) Asai, A., HARA, T., and Franklin, I.E., 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, S., Ishii, Y., Matoba, H. and Inui, T., 1996, "An Inkjet Head Using Diaphragm Micro-actuator," *Proceeding of IEEE MEMS Workshop*, San Diego, California, USA, pp.418~423.
- (6) Zhu, X., Tran, E., Wang, W., Kim, E.S., and Lee, S.Y., 1996, "Micromachined Acoustic-Wave Liquid Ejector," *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, pp. 280~282.