

펄스 에너지 기반의 소형 추력 장치 개발

최수진* · Ardian B. Gojani* · 여재익**

Small Thruster Development Based on Pulse Energy

Soojin Choi* · Ardian B. Gojani* · Jai-ick Yoh**

ABSTRACT

A new concept of a small thruster for altitude control of a micro/nano class satellite is developed, which utilizes the pulsed laser energy. As the laser-based thruster does not require burning of any fuel, it gives promise of small satellite design criteria, namely light weight and cost effectiveness. In this paper, we develop gel-type material for generating strong plasma plume for enhancing thrust for propulsion. Moreover, we quantify the level of thrust via the momentum coupling coefficient measured by the pendulum system. We discover that the driving force is significantly improved via the gel-typed propellant for laser ablation.

초 록

마이크로·나노 급 위성의 자세제어를 위한 소형 추력 장치로써, 펄스 에너지를 활용한 새로운 추력기의 개발 연구를 진행 중이다. 레이저 추진은 연료를 탑재하지 않기 때문에 경량화 및 비용 절감이 가능하고 펄스 에너지 레벨을 조절하여 목적에 적합한 추력을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 높은 추력 발생을 위하여 플라즈마 팽창 제한의 물질로 젤 형태의 물질을 적용하였다. 또한 pendulum system으로 속도를 측정하여 momentum coupling coefficient(C_m)를 도출함으로써 추력 성능이 크게 향상되었음을 확인하였다.

Key Words: Pulse Energy(펄스 에너지), Laser Propulsion(레이저 추진), Laser Ablation(레이저 삭마), Shockwave(충격파), Plasma(플라즈마)

1. 서 론

1972년 Kantrowitz에 의해 레이저 삭마를 기

반으로 한 추진 방식[1]이 처음으로 제안된 이후, 레이저 추진이 화학 로켓 추진을 대체할 수 있는 저비용 추진 기술로 대두되고 있다. 특히 10~100kg급 Micro 위성 및 10kg 이하의 Nano & Pico 위성의 개발에 맞추어 소형위성의 자세 제어와 궤도수정을 위한 새로운 추진 기술의 개발이 요구되는 이 시점에, 본 연구에서는 소형

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 중신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

추력기로서 펄스 레이저를 이용한 추진 시스템의 개발을 진행 중이다. 레이저 추진은 경량화 및 비행 목적에 적합한 추력 제어 면에서 괄목할 만한 성능을 보일 것으로 기대된다.

레이저 추진은 추력 발생 원리에 따라 크게 공기흡입 추진과 삭마(ablation)에 의한 추진, 그리고 액체시료의 분사에 의한 추진으로 구분할 수 있다. 공기흡입 추진[2,3]은 대기권 내에서 적용 가능한 방법으로, 공기 중에서 레이저에 의한 붕괴(breakdown)현상을 일으켜 추력을 발생시키는 방법이다. 삭마에 의한 추진은 시료에 레이저 빔을 조사하여 시료 표면의 일부 질량이 플라즈마 형태로 배출됨으로써 폭발 과정을 수반한 추력 발생을 유도한다. 액체 시료를 사용할 경우 고체 시료와 비교하여 추진력 향상의 가능성이 제시됨에 따라 액체 시료를 추진제 혹은 플라즈마 팽창 제한 물질의 용도[4-6]로 연구 중에 있다. 또한 붕괴로 인하여 발생하는 액체의 분사 효과를 최적화하여[7-9] 소형 추력기를 추진시키는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 플라즈마 팽창을 제한한, 삭마에 의한 레이저 추진 연구를 수행하고 있다. 또한 새로운 플라즈마 팽창 제한 물질으로써 젤 형태의 물질을 사용한다.

2. 삭마에 의한 추진의 원리

레이저 빔이 렌즈를 통과하여 국소 부위에 집중되면 10^9 W/cm^2 이상의 높은 에너지 밀도를 갖게 된다. 이와 같은 고에너지 밀도로 빔이 시료의 표면에 조사되면 시료의 표면 온도가 상승하고 시료의 내부 온도 또한 기화 온도까지 상승하게 된다. 임계점 이상의 고온 고압에 도달하면, 시료 표면이 기체 분자가 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴된다. 레이저에 의해 고온의 플라즈마가 주변의 공기와 상호작용을 일으켜 고온 고압의 기체가 주변으로 팽창해 나가면서 충격파를 발생시킨다[10]. 물질에 펄스 에너지가 전달되어 일어나는 기화 및 원자·이온·분자·파편의 방출, 그리고 충격파와

플라즈마 발생 등의 과정을 포함한 현상이 레이저 삭마이다.

레이저 삭마에 의한 추력 발생은 레이저 조사시 발생한 삭마 현상에 의하여 표면으로부터 운동량을 갖고 있는 원자를 방출하고, 충격파와 플라즈마가 전파되면서 추력 면에 높은 압력을 전달함으로써 이루어진다. 따라서 충격파 전파의 활성화 및 플라즈마 팽창 제한을 통하여 추력 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 원리는 연료의 배기가스 분사를 통하여 질량 유량 및 배기 속도에 비례하는 추력을 얻는 화학 로켓 추진과 차이가 있다.

레이저 삭마는 direct 방식과 confined 방식으로 나누어진다. Fig. 1과 같이 direct 방식에서는 레이저가 단일 시료 표면에 조사되어 추력이 발생되고, confined는 시료의 표면이 투명한 물질로 덮여 있어 플라즈마의 팽창이 제한되어 더 높은 추력을 발생시키게 된다. 플라즈마 팽창을 가두기 위하여 사용되는 물질을 confinement 물질이라고 한다.

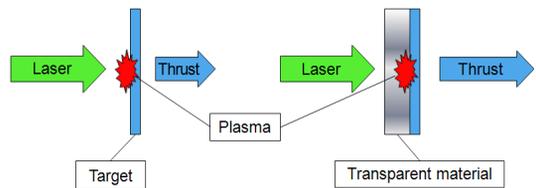


Fig. 1 Mechanism of direct vs confined ablation

3. Confinement 물질의 효과 및 비교

Confinement 물질에 따른 추력 성능 비교를 위한 실험장치 구성은 Fig. 2와 같다. Nd:YAG 레이저에서 펄스레이저가 렌즈를 통하여 높은 에너지 밀도로 시료에 조사된다. 시료는 속도 측정을 위하여 pendulum 형태로 제작되고, 한쪽 면은 두께 0.1 mm의 알루미늄 포일로 막혀 있어 그 앞을 투명한 물질로 채우게 된다. 시료에 레이저가 조사되면 pendulum이 운동을 하게 되고, 이 때 발생하는 신호를 레이저 포인터를 광

원으로 하는 photodetector가 검출하여 오실로스코프로 보내게 된다.

본 실험에서 사용된 Nd:YAG 레이저의 파장은 532 nm이고, 펄스 지속시간은 7 ns 이다.

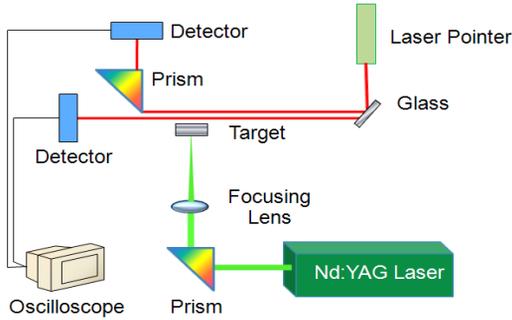


Fig. 2 Schematic of pendulum system

오실로스코프에 나타나는 신호로 time of flight (TOF)을 구할 수 있다. 여기서 TOF란 시료가 검출기로 들어가는 두 광원의 사이를 지나치는 데에 소요되는 시간을 의미한다.

추력 발생 실험에서 궁극적으로 구하고자 하는 의미 있는 값은 Momentum Coupling Coefficient(C_m)이다. C_m 은 시료에 전달되는 모멘텀을 조사된 레이저의 에너지(E_{Laser})로 나눈 값으로, 레이저 추진 연구 시 추력 성능의 척도가 된다.

$$C_m = \frac{mv}{E_{Laser}} \quad (1)$$

식 (1)에서 m 은 시료의 질량이고 v 는 시료의 초기속도이다. 이 때 레이저 에너지는 power meter로 직접 측정이 가능하다. 모멘텀을 유도하기 위한 속도를 구하기 위하여 앞에서 설명한 방법대로 TOF의 측정이 필요하며, 시료가 지나간 거리는 측정 장치에서 두 광원 사이의 거리이므로 속도를 구할 수 있다.

본 연구에서는 confinement 물질로써 젤 형태 물질의 적용 가능성을 확인하고자 실험을 수행하였다. 현재 젤 형태 물질은 액체 및 고체의 중간 성질을 갖고 있어 기존 연료의 문제점 해결을 위하여 레이저 추진 외에 화학 추진의 연료로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

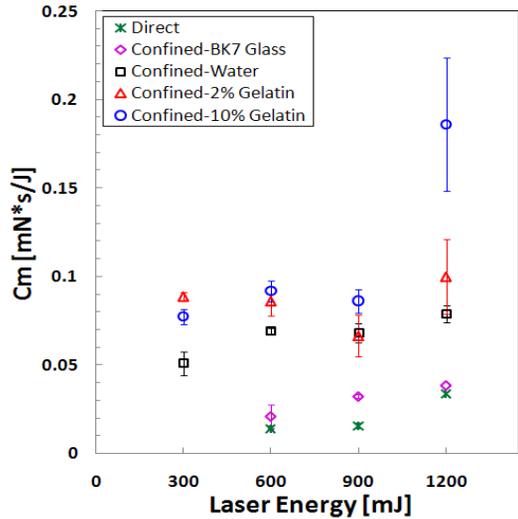


Fig. 3 Comparison of laser thrust due to varied confinements (m=2.24 g)

Figure 3의 실험결과에서 direct 와 confined 삭마로 인한 추력 성능의 차이를 나타내고 있다. Confined 방식 하에서의 C_m 값이 모든 confinement 물질에 대하여 direct의 경우보다 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 confinement 물질로 유리(BK7 glass) 보다 물 혹은 젤라틴이 월등히 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다.

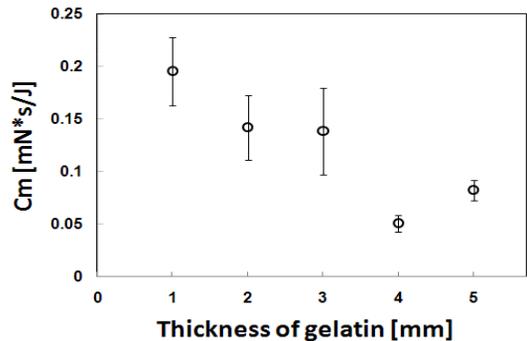


Fig. 4 Thrust performance along thickness of confinement material (10% gelatin, Energy=600 mJ, m=1 g)

Confinement 물질의 두께에 따른 추력 성능을 비교하기 위하여 10% 젤라틴의 두께를 1~5 mm로 변화시켜 가며 실험한 결과가 Fig. 4에 나타

나 있다. 젤라틴의 두께가 증가할수록 추력 성능이 감소하지만, 5 mm 두께에서는 다시 증가하는 현상을 볼 수 있다. 본 실험에서는 높이 5 mm인 용기의 벽면을 기준으로 두께를 측정하였다. 따라서 벽면 부분에서 젤라틴의 두께가 5 mm가 되는 경우, 레이저가 조사되는 용기의 중심 부분은 표면장력에 의하여 볼록한 형태가 된다. 이렇게 볼록한 표면은 볼록렌즈와 같은 역할을 하게 되어[11] 레이저 빔의 집속을 향상시키고, 이러한 현상에 의하여 추력 성능이 증가한 것이다.

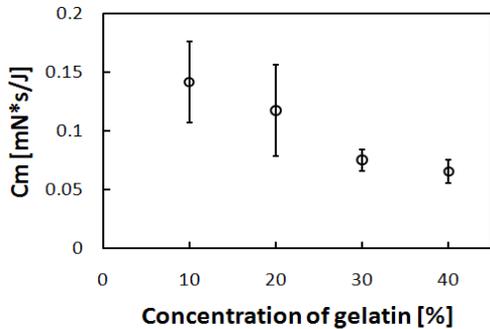


Fig. 5 Thrust performance along concentration of gelatin

Figure 5에서 젤라틴의 농도에 따른 추력 성능을 확인할 수 있다. 본 실험에서 사용된 젤라틴은 10%에서부터 농도가 증가함에 따라 투명도가 크게 감소하여 레이저 빔이 confinement 물질을 통과할 때 에너지 손실을 야기하므로 추력 성능이 감소하게 된다. 따라서 추력 향상을 위한 최적의 농도가 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

Direct보다 confined 방식에 의해 더 큰 추력이 발생함을 다시 한 번 확인하였고, 플라즈마 팽창 제한의 물질로 젤라틴의 사용 가능성을 검증하였다. 또한 같은 조건 하에서 confinement 물질의 두께에 따라 4배 가량의 추력 성능 향상을 이끌어냈고, 물질 표면의 상태 또한 추력 발

생에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 본 실험에서는 10% 농도의 젤라틴을 사용할 경우 최대 추력이 발생됨으로써 최적의 농도, 즉 점도가 존재함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심기초(구 특정기초) 연구사업(R01-2008-000-11332-0)의 지원 하에 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

1. A. R. Kantrowitz, *Aeronautics and Astronautics*, Vol. 9, No. 3, pp. 40-42, 1972.
2. L. N. Myrabo, D. G. Messitt, F. B. Mead Jr, *AIAA Paper 98-1001*, 1998
3. Zhiping Tang et al., *AIP Conference Proceedings 997*, pp. 104-113, 2006.
4. C. Phipps, J. Luke, T. Lippert, M. Hauer, and A. Wokaun, *J. Propulsion and Power*, 20 no. 6, pp. 1000-1011, 2004.
5. J. Sinko and A.V. Pakhomov, *AIP Conference Proceedings 997*, pp. 195-208, 2008.
6. J. Sinko and A.V. Pakhomov, *AIP Conference Proceedings 997*, pp. 209-221, 2008.
7. T. Yabe et al., *Appl. Phys. A77*, pp. 243-249, 2003.
8. T. Yabe et al., *AIP Conference Proceedings 702*, pp. 503-512, 2004.
9. T. Ohkubo et al., *AIP Conference Proceedings 766*, pp. 394-405, 2005.
10. J. Yoh et al., *J. Appl. Phys. Vol. 103, No.5*, 2008.
11. C. Favre et al., *Phys. Rev. Lett.* 89, 035002, 2002.