

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(2), 120-126(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.2.120>

빠른 속도의 우주먼지 모사를 위한 레이저기반의 입자가속에 관한 실험적 연구

백원계, 여재익*

Experimental Study on Laser-driven Miniflyer for Description of Space Debris with High-speed

Won-Kye Baek and Jai-ick Yoh*

Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
Institute of Advanced Aerospace Technology

ABSTRACT

Increasing numbers of space debris around the earth now pose a major threat to satellites as their impact velocity may reach up to several km/s. We use a pulse laser to accelerate a miniflyer for mimicking the space debris. The multi-layer coat on the confined medium is known to promote a higher acceleration. However, it requires some special techniques which take somewhat long time and cost to coat. Instead, we devised a simple concept to coat by the black lacquer paint on a flyer. It shows improvement in the flyer velocity by 1.5-2 times the uncoated, and the resulting velocity reached 1.42km/s with Nd:YAG laser energy under 1.4 joules. The resulting velocity is suitable for satellite vulnerability test for debris impact in the geostationary orbit.

초 록

현재 자연적 또는 인공적으로 늘어난 지구 주위의 수많은 미세 입자들은 인공위성에 위협이 되고 있으며 인공위성과 우주 먼지간의 충돌 속도는 수 km/s에 이른다. 본 연구에서는 이러한 우주 먼지를 모사하기 위하여 작은 금속판을 레이저를 이용하여 가속하였다. 기존 연구에서는 다중코팅을 이용하여 속도 효율을 향상시켰으나 코팅하는데 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있었다. 본 연구에서는 그러한 다중코팅 대신 단순한 검은색 페인트를 이용하여 코팅을 하지 않았을 때보다 1.5~2배 정도의 속도향상을 보였으며 Nd:YAG 레이저를 이용하여 1.4J이하에서 최대 1.42km/s의 속도를 얻었다. 이 속도는 정지궤도에서의 인공위성과 우주먼지 충돌을 모사하는데 적합하다.

Key Words : Space Debris(우주 먼지), Satellites(인공위성), Impact Velocity(충돌 속도), Pulse Laser(펄스 레이저), Black Paint(검은색 페인트)

1. 서 론

현재 지구 주위에는 약 20000개 가까운 인공 위성이 운용이 되고 있으며 정지궤도에만 1200개

가량 떠돌아 다니고 있다. 이렇게 인공위성이 많아지면서 지구 주위의 수많은 작은 입자 또는 먼지들에 의해 피해를 받는 경우가 많이 생기고 있다. 초고속도로 움직이는 입자들이 물체의 표면

† Received: July 12, 2012 Accepted: January 13, 2013

* Corresponding author, E-mail : jjyoh@snu.ac.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

에 충돌하는 순간 약 4700℃의 온도와 수 Mbar의 압력이 발생한다[1]. 따라서 우주 먼지 등이 인공위성에 충돌하면 인공위성의 기능수행에 많은 지장을 주며, 태양광판에 충돌이 축적되면 효율을 상당히 떨어뜨리기도 한다.

본 연구는 이러한 인공위성과 우주 먼지의 충돌을 재현하기 위한 기초연구로 수행되었다. 위성과 우주 먼지의 충돌속도는 수 km/s를 상회하기도 한다[2]. 따라서 본 연구에서는 지름이 2mm 이상의 얇은 원형 금속박을 1km/s 이상의 속도로 가속시키는데 초점을 두었다. 이정도 크기의 금속판을 가속시키는 데는 레이저를 이용하는 것이 매우 유용하다. 그 이유는 다른 가속장치(rail gun, two-stage gas gun)에 비해 규모도 작을 뿐만 아니라 반복성과 재현성이 좋고 제어 가 쉽기 때문이다.

현재까지 이러한 레이저를 이용한 입자가속은 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 상태방정식, 강도, 상변화 등의 물질의 동적특성을 알아내기 위한 충격과 실험[3-6]에 많이 응용이 되어왔으며 그 외에도 측정과 가공분야에서도 많이 응용되었다[7-9]. 또한 본 연구와 같은 우주 먼지를 모사하기 위한 실험에도 많이 응용되고 있다[10, 11].

선행 연구들에서 주로 이용한 방법은 얇은 금속박을 투명한 유리 매질에 코팅을 한 뒤 펄스 레이저를 투명 매질쪽으로 조사하여 맞은 금속박 부위가 레이저의 직경만한 지름의 원반 형태로 분리되어 가속되게 한 것이다. 이러한 방법의 단점은 유리 매질과 금속박 사이에 공기가 들어가지 않도록 완전 밀착된 결합을 해야하기 때문에 코팅과정이 복잡하며 비용과 시간이 많이 든다는 것이다. 또한 빔 profile이 좋지 않을 경우에는 단일하고 평평한 금속박이 아닌 여러 개로 분리된 작은 입자들이 가속될 수 있다[3, 4, 10, 11]. 이러한 실험들은 수 마이크로미터의 얇은 금속박을 이용하여 수 km/s의 속도를 얻었으나 입자 자체가 작으므로 운동량이 작고 단일한 금속박이 아닌 여러 개로 분리된 조각인 경우가 많다.

단일한 flyer를 가속시키고자 일정한 지름과 두께를 가진 원형 금속박을 탄소막을 포함한 다중막에 붙여서 가속시키는 방법도 등장하였다[5, 6]. 여기서 탄소막은 레이저 에너지를 흡수하여 플라즈마를 발생시킴으로써 입자를 가속시키는데 핵심적인 역할을 하며 순수한 금속에 조사할 때 보다 효율이 좋다[12]. 하지만 역시 다중 코팅을 하는데 electron beaming, magnetron sputtering 등의 기술을 적용하여 시간과 비용이 많이 들고 투명 매질 자체에 코팅을 해야 하므로 실험의 횟수에 있어서 한계가 있다.

본 연구에서는 다중코팅을 하지 않고 값싸고 쉽게 구할 수 있는 검은색 페인트 코팅을 이용하여 속도 효율을 높였다. 또한 강한 레이저 에너지에 의한 충격파로 인해 flyer자체가 조각으로 분리되는 것을 막고 모멘텀이 큰 flyer를 얻기 위하여 25~100μm의 상대적으로 두꺼운 금속박을 가속시켰다. 또한 초고속카메라를 이용하여 flyer의 비행특성에 대해서도 살펴보았다.

II. 본 론

2.1 가속 원리

본 레이저 유도 금속박 가속의 원리는 레이저의 빔 에너지가 금속박의 운동에너지로 전환되는 것이다. 좀 더 자세하게 그 과정을 설명하자면 10^9W/cm^2 이상의 나노 초급 이하의 펄스 레이저 빔이 렌즈를 통해 금속 표면에 집속(focusing)이 되면 순간적으로 높은 에너지에 의해 금속 표면 중 일부분이 삭마(ablation)되어 기화(vaporization)되고 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴(breakdown)된다. 이후 플라즈마와 주변의 공기의 상호작용에 의해 고온, 고압의 기체가 팽창해 나가면서 충격파를 발생시킨다[13, 14]. 이 충격파에 의해 남아있는 금속박이 굉장히 빠른 속도로 가속이 된다(Fig. 1). 여기에 레이저가 입사되는 금속박의 표면 쪽에 투명한 매질이 있고 고정되어 있다면 가둠 효과(confinement effect)에 의해서 효율이 더욱 좋아진다. 다시 말해, 발생한 플라즈마가 한쪽으로는 팽창할 길이 막혀 있으므로 반대편 쪽으로 더 큰 운동량을 전달할 수 밖에 없으며 그 결과 금속박이 더 빠른 속도로 가속되는 것이다.

레이저 삭마에 의해 발생하는 압력은 대략적으로 다음과 같은 식으로 표현된다[13, 15].

$$P_{abl} \sim 40(I/\lambda)^{2/3} \quad (1)$$

여기서 I 는 레이저 빔 강도(irradiance)이며 λ 는 레이저 빔의 파장이다. 이 식에 의하면 본 실험

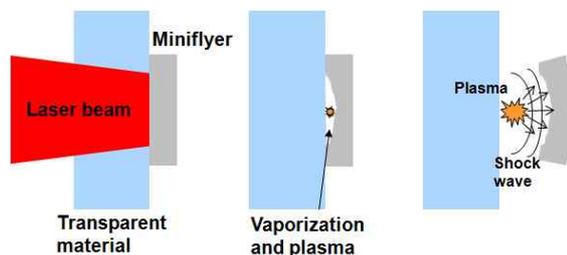


Fig. 1. Process of acceleration of laser-driven miniflyer

에서는 금속의 레이저 삭마에 의해 순간적으로 대략 수 십 GPa의 압력이 발생한다. 만약 레이저 에너지를 훨씬 많이 흡수하는 재질이라면 레이저 삭마에 의해 발생하는 압력은 훨씬 클 것이다. 이미 앞서 언급한대로, 효율을 높이기 위해 기존에는 투명한 매질에 탄소(carbon), 알루미늄(Al_2O_3), 알루미늄 등의 다중 코팅(multi-layer coat)을 이용하였다. 그 중에서 탄소막이 반사/흡수 비율이 낮기 때문에 금속보다 더 많은 레이저 에너지를 플라즈마로 전환함으로써 가속 효율을 높이는데 핵심적인 역할을 한다[12]. 하지만 이러한 다중 코팅은 electron beaming, magnetron sputtering 등 어려운 기술이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 코팅을 사용하지 않고 검은색 페인트 코팅을 이용하여 거의 비슷한 입자의 속도를 얻을 수 있었다. 검은색은 다른 어떤 색보다도 빛, 열 등의 에너지를 많이 흡수하며 페인트 재질 또한 일반 금속에 비해 훨씬 많은 에너지를 흡수한다[16, 17]. 따라서 일반 금속보다 레이저 삭마에 의해 큰 압력을 발생시키며 가속 효율을 높일 수 있다.

2.2 실험 구성

전체적인 실험 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 금속박 가속의 에너지원으로 펄스 지속시간(pulse duration)이 9ns, 파장은 1064nm인 Nd:YAG 펄스 레이저를 에너지 100~1400mJ까지 사용하였고 12mm 직경의 레이저 빔을 렌즈를 이용하여 약 1.9mm로 금속박에 집속시켰다. 1.9mm로 집속시킨 이유는 본 실험 조건에서 가장 속도 효율이 좋았기 때문이다. 레이저 빔 직경에 따른 금속박의 속도에 대한 실험결과 또한 본 연구에 포함되어 있다.

실험에서 사용한 금속박은 구리와 알루미늄 재질로 원형의 얇은 판 형태로 제작하였다. 구리의 경우 지름 2.6mm, 두께 25, 50 μ m 금속박을 사용하였고, 알루미늄의 경우 지름 2.1mm, 두께 25, 50, 100 μ m 금속박을 사용하여 실험하였다.

검은색 페인트는 일반 시중에서 파는 락카 페인트를 사용하였다. 페인트 코팅된 원형 금속박을 만들기 위하여 먼저 해당 두께의 얇은 금속박 전체의 한쪽 면에 스프레이형 락카 페인트를 틈이 보이지 않게 골고루 뿌렸다. 잘 말린 후 내경 2.1, 2.6mm에 해당하는 펀치 공구를 이용하여 원형의 금속박을 Fig. 3 왼쪽과 같이 찍어내었다. 찍어낸 직후에는 원형 금속박이 휘어져 있기 때문에 Stainless steel 재질의 실린더를 이용하여 평평하게 펴주었다.

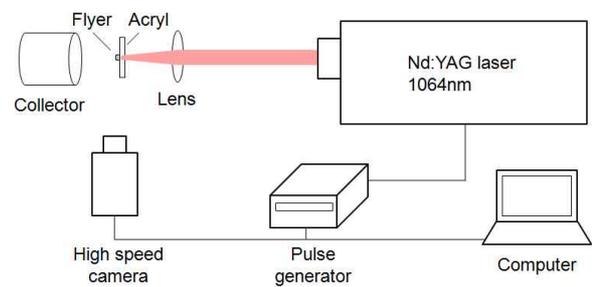


Fig. 2. Experimental setup of laser-driven miniflyer(LDF)

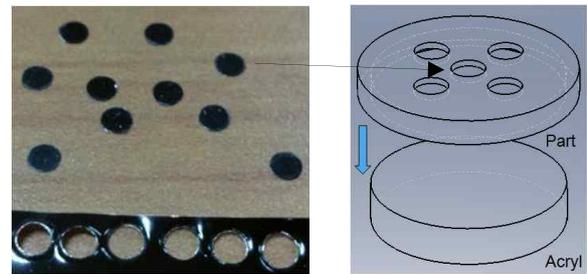


Fig. 3. Miniflyers made from metal sheet coated with black paint and positioning

이렇게 만들어진 원형 금속박을 지름 15mm, 두께 3mm의 투명 아크릴 위에 고정시켜 레이저를 조사하였다. 아크릴은 앞서 언급한 confinement effect를 위한 매질이다. 항상 동일한 곳에 고정하기 위하여 Fig. 3 오른쪽에 나와 있는 부품(part)을 이용하였다. 이 부품은 아크릴로 만들었으며 투명 아크릴 위에 뚜껑처럼 끼운 후 레이저가 집속되는 위치를 맞춘 구멍에 원형 금속박을 페인트가 코팅된 면이 아크릴에 닿도록 넣어서 고정시켰다. 고정이 된 후 부품은 다시 분리하였다. 원형 금속박을 아크릴에 붙이기 위하여 특별한 접착제를 사용하지는 않았다. 그 이유는 접착 물질에 레이저 빔이 흡수되거나 굴절이 일어날 수 있기 때문이다. 그래서 대기압만을 이용하여 고정하였고 원형 금속박의 규모가 작기 때문에 충분히 고정이 가능하였다.

원형 금속박의 속도를 측정하고 날아가는 특성을 관찰하기 위하여 초고속 카메라(Phantom)를 사용하였다. 대략 9mm정도 날아가는 flyer를 촬영하였으며 초당 150,000 프레임 과 1000,000프레임의 sample rate를 이용하였다. 이미지의 간격을 초로 환산하면 약 6.7 μ s와 1 μ s이다. 속도는 각 이미지를 통해 날아간 거리를 측정하고 이미지간의 시간 간격으로 나누어서 구한 것으로 평균속도에 해당한다.

마지막으로 초고속 카메라로 날아가는 이미지

를 잡기 위해서는 레이저 발진시간과 초고속 카메라의 촬영 시작 시간을 일정한 간격을 두고 동기화할 필요가 있다. 따라서 펄스제너레이터를 이용하여 두 기기간의 시간간격을 동기화 시켰으며 또한 Nd:YAG 레이저의 delay time을 조절하여 에너지를 조절하는데도 사용하였다.

2.3 결과 및 분석

본 실험에서는 빔 직경이 flyer속도에 미치는 영향과 검은색 페인트의 속도 상승 효율, 그리고 각 조건의 flyer의 경우에 레이저 펄스 에너지의 변화에 따른 속도를 알아보았다.

가장 먼저 원형 금속박 뒤에 집중되어 조사되는 펄스 레이저 빔의 직경을 정하기 위하여 레이저 펄스 에너지를 400mJ로 고정하고 빔의 직경을 변화시켜가며 flyer의 속도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 빔의 직경이 커질수록 속도도 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 빔 직경이 1.75mm이후로 거의 속도 상승이 보이지 않았다. 원형 금속박 뒤에 지름 D 로 펄스레이저가 조사되고 있다면 힘은 압력과 면적의 곱이므로 식 (1)에 의해서 원형금속박이 레이저 삭마에 의한 압력에 받는 힘은 다음과 같이 $F_{abl} = P_{abl}A = CD^{2/3}$ 로 표현될 수 있다.

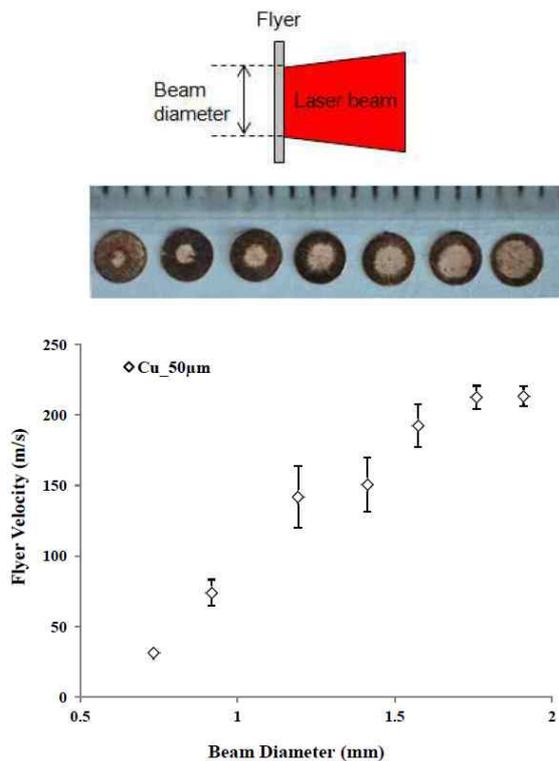


Fig. 4. Effect of beam diameter on the flyer velocity

여기서 A 는 빔의 단면적으로써 $\pi D^2/4$ 로 표현이 되고 식 (1)에서 I 는 레이저의 파워(W)를 단면적 A 로 나눈 값이므로 C 는 레이저의 파워와 빔의 파장으로 이루어진 상수이다. 레이저에 의해 원형 금속박에 가해진 충격량은 결국 원형 금속박의 증가한 운동량과 같게 되므로 원형 금속박의 속도 또한 $D^{2/3}$ 에 비례하게 된다. 하지만 빔 직경이 너무 커져서 빔 강도가 너무 작아지면 삭마 자체가 일어나지 않게 되므로 빔 직경이 커질수록 속도가 계속 증가하지는 않는다. 따라서 Fig. 4의 결과는 이론적 추정에 잘 부합하며 본 실험에서는 원형 금속박의 최소 지름 2.1mm보다 작으면서 가장 좋은 효율을 보인 약 1.9mm의 빔 직경을 사용하였다. 또한 빔 직경이 원형 금속박의 지름에 가까울수록 먼 전체에 힘을 고루 줄 수 있으므로 평평하게 잘 날아갈 수 있다.

검은색 페인트의 효과는 Fig. 5의 초고속 카메라 이미지에 잘 나타나 있다. 두 연속된 이미지는 두께 50 μ m의 구리 금속박에 레이저 펄스 에너지를 1300mJ로 조사했을 때 각각 페인트 코팅된 금속박과 되어 있지 않은 금속박이 날아가는 이미지를 촬영한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 검은색 페인트 코팅이 있을 때의 속도가 없을 때의 속도보다 훨씬 빠르다. 그 이유는 순수한 금속에서보다 페인트로부터 나오는 플라즈마에 의한 압력이 훨씬 크고 강하기 때문이다. 두 경우 모두 레이저 빔 분포가 Gaussian 형태라서 중앙에서 발생하는 압력이 주위에 비해 크기 때문에

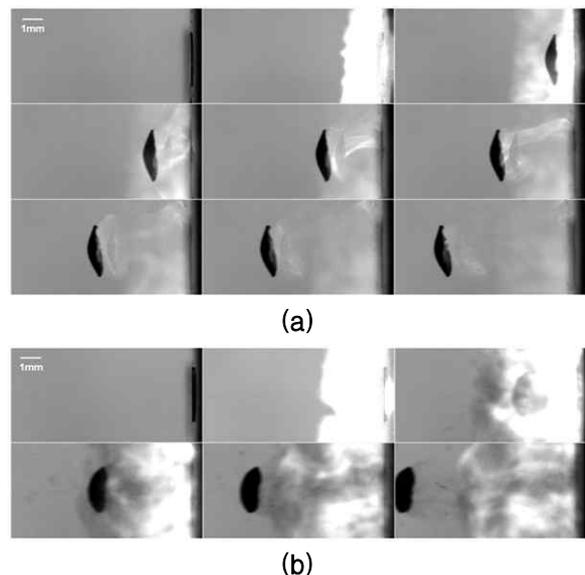


Fig. 5. Images of copper flyer of thickness 50 μ m and diameter 2.6 mm (a) non-coated flyer (b) black paint coated flyer (150,000fps)

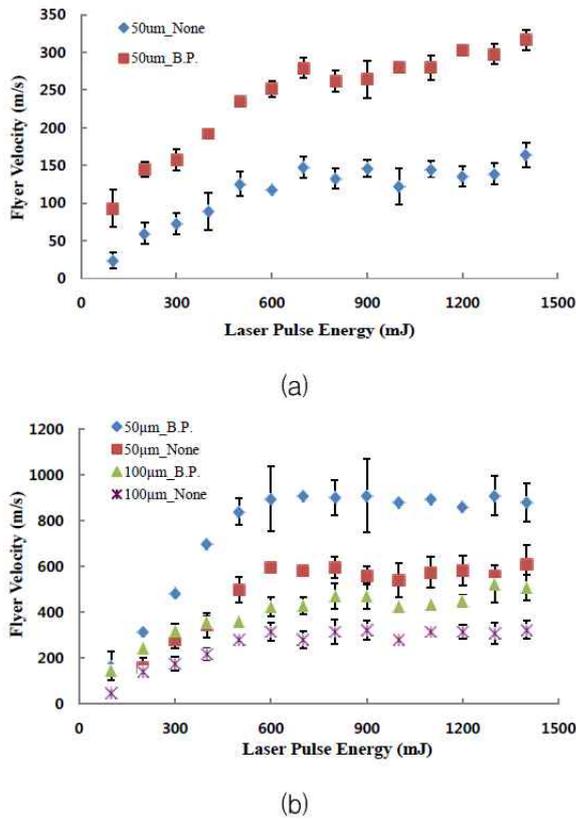


Fig. 6. Velocity comparison of black paint coat vs. no coat (a) copper flyer, (b) aluminum flyer

가운데 부분을 중심으로 금속박이 휘어지는데, 페인트 코팅이 되어 있는 금속박이 더 많이 휘어졌다. 또한 플라즈마로부터 나오는 빛이 페인트 코팅이 되어 있을 때 훨씬 강하고 더 오래 지속된 것을 볼 때 페인트로부터 나오는 플라즈마가 더욱 강한 것을 알 수 있다.

Figure 5는 대표적인 예를 하나 나타낸 것이며 실제로 다양한 레이저 펄스 에너지에서 페인트 코팅이 되었을 때와 되지 않았을 때를 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 검은색 페인트의 효과가 그래프에 비교적 잘 나타나 있다. 구리 금속박의 경우에는 약 2배, 알루미늄 금속박의 경우에는 약 1.5배 이상 속도가 향상되었다.

그리고 검은색 페인트 코팅을 한 각 두께에 따른 금속박들의 레이저 펄스 에너지에 따른 속도 결과가 Fig. 7에 잘 나타나 있다. 두께가 얇을수록 속도가 빨라졌으며 알루미늄 금속박이 구리보다 훨씬 빠른 속도를 나타내었다. 그 이유는 질량이 작기 때문이다. 레이저 가속의 원리는 레이저의 빔 에너지를 금속박의 운동에너지로 전환하는 것이다. 따라서 금속박의 속도는 레이저 펄스 에너지(E)와 변환율(conversion efficiency, k)

을 질량(m)으로 나눈 값의 제곱근(즉, $v = \sqrt{\frac{2kE}{m}}$)에 따라 변한다[18].

다시 말하면, 속도는 질량의 제곱근에 반비례하며 레이저 펄스 에너지(E)의 제곱근에 비례하여 빨라지는 경향을 갖는다. 하지만 Fig. 6과 7에서 700mJ 이상의 에너지에서는 flyer들의 속도상승이 크지 않다. 그 이유는 플라즈마 쉴드(plasma shielding) 효과 때문이다. A. B. Gojani *et al*[19]에 따르면 레이저 펄스 지속시간의 초반부에 생긴 플라즈마가 이후 지속되는 레이저 빔을 흡수하여 타겟을 보호하는 효과를 가지는데, 에너지가 커질수록 그러한 효과는 강해진다. 따라서 6~700mJ 이상부터 상당한 양의 입사되는 레이저 에너지가 플라즈마에 흡수되어 flyer의 속도 상승이 매우 제한을 받은 것으로 볼 수 있다.

본 실험에서 변환율을 구하기 위하여 Fig. 7의 그래프를 레이저 펄스 에너지의 제곱근에 대한 속도 그래프로 나타내었다(Fig. 8). 레이저의 모

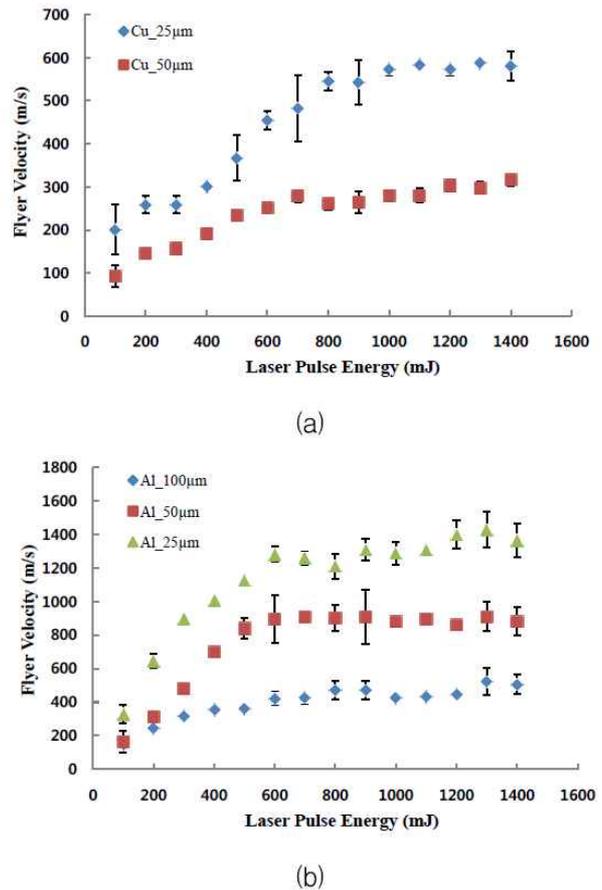


Fig. 7. Flyer velocity versus laser pulse energy for (a) copper flyer (b) aluminum flyers

든 에너지에서 원형 금속박 표면의 삭마가 일어나지는 않기 때문에 원형 금속박을 가속시키는 최소에너지가 존재하게 된다. 따라서 속도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[20].

$$v = A\sqrt{E} - E_0 \quad (2)$$

여기서 $A = \sqrt{2k/m}$ 이고 E_0 는 금속박을 가속시킬 수 있는 최소에너지이다. 그래프에서 약 700mJ 이상부터는 속도상승이 눈에 띄게 일어나지 않으므로 그래프가 선형을 나타내는 600mJ까지의 자료를 이용하여 선형 근사식을 나타낼 수 있었으며 근사식의 기울기(A)값을 이용하여 변환율(k)을 구하였다. 각 변환율은 표 1에 나타내었다.

표와 같이 변환율은 구리와 두께 100 μ m의 알루미늄 금속박에서는 약 15~17% 정도를 나타냈지만 알루미늄 금속박이 50, 25 μ m 두께일 때는 변환율이 매우 많이 상승했다. 그 이유는 가우시안 빔이 알루미늄 두께 50, 25 μ m의 금속박에 조사될 때 가운데 부분에서의 intensity(W/cm^2)가 너무 높아 압력이 너무 높게 생성되어 가속 되어 날아가는 가운데 부분이 금속박의 주변부와 분리되기 때문이다(Fig. 9).

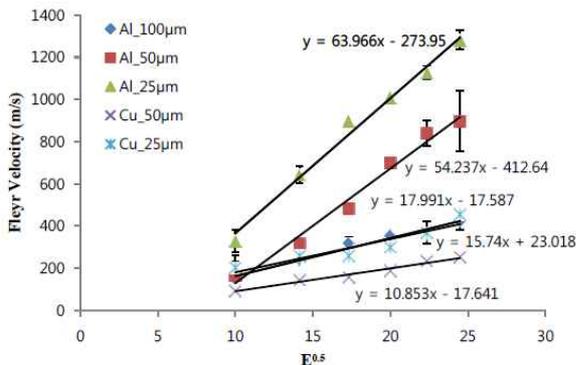


Fig. 8. Plot of velocity versus the square root of laser pulse energy for various flyers (from 100 mJ to 600 mJ of laser pulse energy)

Table 1. Conversion efficiencies according to various flyers

Flyer 재질	Flyer 지름 / 두께	Flyer 질량	변환율, k
구리	2.6mm / 25 μ m	0.001379 g	17.1 %
	2.6mm / 50 μ m	0.002464 g	14.5 %
알루미늄	2.1mm / 25 μ m	0.000279 g	57.1 %
	2.1mm / 50 μ m	0.000493 g	72.5 %
	2.1mm / 100 μ m	0.000964 g	15.6 %

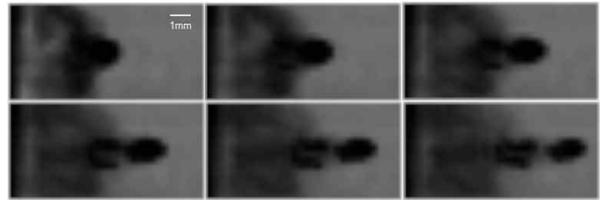


Fig. 9. Separation of Al flyer of thickness 50 μ m at 400mJ, pulse energy (taken at 1000,000 fps)

따라서 본 실험에서 변환율은 약 15~17%이며 이것은 검은색 페인트의 변환율을 나타낸다고 할 수 있다. 그리고 분리를 막기 위해서는 beam shaper 등을 이용하여 빔 형태를 가우시안이 아닌 사각형태(flat top profile)로 바꾸어 조사하는 것이 매우 유용하나 본 연구에서는 space debris를 묘사하는 것이 목적이므로 가운데서 떨어져 나온 부분도 충분히 space debris를 묘사하는데 별 문제가 없다.

실험을 통해 얻은 최고속도는 두께 25 μ m의 알루미늄 금속박에서의 1.42km/s 로써 본 연구에서 목표로 했던 1km/s 이상의 속도를 얻었으며, 정지궤도에서 인공위성과 우주먼지간의 충돌속도로 알려진 1.5km/s에 거의 근접한 속도였다[2]. 따라서 향후 인공위성의 태양광판과의 충돌 모사 실험에 충분히 응용 가능할 것으로 보인다.

III. 결 론

본 연구에서는 빠른 속도의 우주먼지 모사를 위한 실험이 수행되었다. flyer로써 알루미늄과 구리를 이용하였고 레이저 빔 에너지의 흡수를 높이기 위하여 금속 뒷면에 검은색 페인트를 코팅하여 레이저를 조사하였다. 그 결과, 페인트를 코팅했을 때가 코팅하지 않았을 때보다 1.5~2배 가량 속도가 향상되었고 질량이 가벼운 알루미늄 flyer에서 최대속도 약 1.42km/s가 나왔다. 이를 이용하여 특히 정지궤도에 있는 인공위성과 우주먼지 등의 충돌속도인 1.5km/s를 재현할 수 있으며 충돌실험, 미세가공분야에서도 활용할 수 있을 것이라 기대된다. 추후 코팅된 페인트의 두께 및 양이 속도에 미치는 영향의 정량적인 분석이 필요하며, 본 연구가 그 기초자료를 제공했는데 그 의의가 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발사업(NSL, National Space Lab)으로부터

지원을 받아 수행 되었습니다.

References

- 1) Stein, C., Roybal, R., Tlomak, P., In: Werling, E., editor., *Proceedings of the Eighth International Symposium on Materials in Space Environment Toulouse*, France: CNES Publication, 2000
- 2) Walker, R., Martin, C., Stokes, H., Wilkinson, J., Sdunnus, H., Hauptmann, S., Beltrami, P., and Klinkrad, H., *Update of the ESA Space Debris Mitigation Handbook*, ESA Contract 14471/00/D/HK, 2002
- 3) Hongo, T., Matsuda, A., Kondo, K., Nakamura, K., and Atou, T., " Flyer Acceleration by Pulsed Laser and its Application to Shock-Recovery Experiment on MnF₂," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, 2005, pp.5006~5008.
- 4) Watson, S., Gifford, M. J., and Field, J. E., " The initiation of fine grain pentaerythritol tetranitrate by laser-driven flyer plates," *Journal of applied physics*, Vol. 88, 2000, pp.65~69.
- 5) Swift, D. C., Niemczura, J. G., Paisley, D. L., Johnson, R. P., Luo, S. N., and Tierney IV, T. E., " Laser-launched flyer plates for shock physics experiments," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, 2005, 093907
- 6) Paisley, D. L., Luo, S. N., Greenfield, S. R., and Koskelo, A. C., " Laser-launched flyer plate and confined laser ablation for shock wave loading: Validation and applications," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 79, 2008, 023902
- 7) Zhou, M., Zhang, Y. K., and Cai, L., " Adhesion measurement of thin films by a modified laser spallation technique : theoretical analysis and experimental investigation," *Applied Physics A*, Vol. 74, 2002, pp.475~480.
- 8) Ocana, J. L., Morales, M., Molpeceres, C., Garcia, O., Porro, J. A., and Garcia-Ballesteros, J. J., " Short pulse laser microforming of thin metal sheets for MEMS manufacturing," *Applied Surface Science*, Vol. 254, 2007, pp.997~1001.
- 9) Di, J., Zhou, M., Li, J., Li, C., Zhang, W., and Amoako, G., " Micro-punching process based on spallation delamination induced by laser driven-flyer," *Applied Surface Science*, Vol. 258, 2011, pp.2339~2343.
- 10) Roybal, R., Tlomak, P., Stein, C., and Stokes, H., " Simulated space debris impact experiments on toughened laminated thin solar cell cover glass," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 23, 1999, pp.811~821.
- 11) Verker, R., Eliaz, N., Gouzman, I., Eliezer, S., Fraenkel, M., Maman, S., Beckmann, F., Pranzas, K., and Grossman, E., " The effect of simulated hypervelocity space debris on polymers," *Acta Materialia*, Vol. 52, 2004, pp.5539~5549.
- 12) Stahl, D. B., and Paisley, D. L., US Patent No. 5,301,612, 1994
- 13) Russo, R. E., " Laser ablation," *Applied Spectroscopy*, Vol. 49, 1995, pp.14A~28A.
- 14) Han, T. H., Gojani, A. B., and Yoh, J. J., " Biolistic injection of microparticles with high-power Nd:YAG laser," *Applied Optics*, Vol. 49, 2010, pp.3035~3041.
- 15) Fairand, B. P., and Clauer, A. H., " Laser generation of high amplitude stress waves in materials," *Journal of Applied Physics*, Vol. 50, 1979, pp.1497~1502.
- 16) Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., " Introduction to Heat Transfer 5th edition," John Wiley & Sons, 2007, pp.719~720.
- 17) Kim, Y. H. Baek, W. K., and Yoh, J. J., " Interaction of beam and coated metals at high power continuous irradiation," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, 2011, pp.780~784.
- 18) Lawrence, R. J. and Trott, W. M., " Theoretical analysis of a pulsed-laser-driven hypervelocity flyer launcher," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 14, 1993, pp.439~449.
- 19) Gojani, A. B., Yoh, J. J., and Yoo, J. H., " Extended measurement of crater depths for aluminum and copper at high irradiances by nanosecond visible laser pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 255, 2008, pp.2777~2781.
- 20) Miller, C. W., " Set-up and evaluation of laser-driven miniflyer system", M. S. Dissertation, Georgia Institute of Technology, May 2009