

우주에서의 펄스 에너지 활용

최수진* · 한태희* · 이현희* · 이경철* · 여재익**

Pulse Energy Utilization in Space

Soojin Choi* · Tae-hee Han* · Hyunhee Lee* · Kyung-cheol Lee* · Jai-ick Yoh**

ABSTRACT

The blast wave released during the initiation of energetic materials gives rise to pulse energy generation, characterized by a sudden increase of potential energy. A highly efficient energy source, sought from pulse-type lasers, may be utilized in various space propulsion and power applications. This paper introduces a scheme of utilizing the laser energy in 1) attitude control of a satellite requiring of a low thrust, 2) innovative laser-induced drug delivery, 3) implosion-based micro piston development, 4) deflecting and zapping of space debris for laser kill purpose, and 5) finally lunar detection using laser induced breakdown spectroscopy.

초 록

레이저는 도구의 개념을 넘어서 추력 및 동력을 발생시키는 새로운 에너지원으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 위성의 자세제어 시 필요한 추력을 레이저 추진 방식으로 구축하는 방안과 마이크로 추진 기술을 활용한 약물전달 연구를 소개한다. 또한 레이저를 새로운 에너지원으로 적용하여 친환경 그린 에너지를 획득하고, 고에너지 물질을 점화·가열하며, 나아가서는 우주에서의 파편 제거 등 레이저 킬 무기체계 구축과 행성·위성 탐사 시 구성 물질의 성분을 분석할 수 있는 효과적인 방법에 대하여 논하였다.

Key Words: Pulse Laser(펄스 레이저), Laser Ablation(레이저 삭마), Space Debris(우주파편), Laser Kill(레이저킬), LIBS (레이저유도파열분광법), Implosion(임플로전), Drug Delivery(약물 전달), Ignition(점화), Energetic Materials(고에너지 물질)

1. 서 론

레이저는 단색성, 방향성, 간섭성, 그리고 높은 에너지 밀도를 갖는 빛으로, 미세 기계항공 및 생체 공학 등 다양한 분야와 접목하여 사용되고 있다. 현재에는 이처럼 널리 상용화된 분야 외에 레이저를 새로운 에너지원으로 적용하기 위한 방안과 레이저 추진 및 상 폭발 과정에 관한 연

† 2009년 1월 13일 접수 ~ 2009년 2월 16일 심사완료

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

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

구가 진행 중에 있다.

한 예로, 1972년 Kantrowitz는 레이저에 의한 물질의 삭마로 인하여 발생된 증기와 플라즈마 제트로 추진에 필요한 추력을 발생시키는 방법을 제안하였다 [1]. 이 때 같은 조건 하에서 최적의 추력을 발생시키기 위한 방안은 물질의 삭마와 그로 인한 물질 방출에 관한 물리적 메커니즘에 있고, 레이저-물질 간의 상호작용은 레이저 추진 이외의 다른 적용 분야에서도 중요한 개념이다.

레이저 삭마(laser ablation)는 레이저가 물질에 조사될 때 온도가 빠르게 상승하여 급격한 증발 및 폭발이 일어나는 현상이다. 레이저-물질 간의 상호작용은 (i) 레이저 에너지·펄스 지속시간·과장과 같은 레이저와 빔의 특성, (ii) 빔과 플라즈마 confinement 상태에 따른 빔의 전달 과정, (iii) 레이저가 조사되는 물질의 화학 조성 및 반사·흡수·열전달 등의 특성에 의존한다.

레이저가 한 점에 집중되기 시작하면 높은 온도와 압력에 의해 기체 분자가 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴된다. 플라즈마 상태의 영역에 광양자, 즉 레이저 에너지가 조사되면 분포되어 있던 전자와 양이온, 그리고 중성자의 활발한 운동을 더욱 가속시키게 되어 서로 충돌을 일으키게 된다. 이 때 충돌에 의해 감속된 에너지만큼을 외부로 방출시키게 되는데, 이것을 제동복사(Bremsstrahlung)라 한다. 이후 플라즈마의 전자와 양이온 및 중성원자는 에너지에 의해 더욱 가속되며 에너지를 흡수한다(역 제동복사). 결국 시료 표면에 발생한 플라즈마 기체 근처의 압력은 10^5 MPa, 온도는 10^4 Kelvin 이상으로 올라간다.

이와 같이 레이저 조사로 인한 온도와 압력의 상승은 물질을 점화·가열시키는 에너지원으로 적용할 수 있다. 또한 고온·고압의 기체가 충격파의 발생을 수반할 경우, 이를 적용한 추진 시스템의 구축이 가능하다. 본 논문에서는 레이저를 사용한 새로운 에너지원 및 추진 시스템 구축의 가능성을 시사하고, 다양한 적용 분야를 제시한다. 특히 우주에서의 펄스에너지 활용가능성

에 대하여 설명하고 현재 진행되고 있는 국내외 관련연구의 현주소를 알아본다.

2. 펄스 레이저 기반의 추력 발생 장치

2.1 위성의 자세제어를 위한 레이저 추진

2.1.1 펄스 추진 연구의 배경 및 동향

1957년 소련에서 최초의 인공위성인 Sputnik를 성공적으로 발사한 이래로 50여년 동안 위성 기술은 비약적으로 진보하였다. 이러한 발전을 바탕으로 인공위성은 군사적 용도뿐만 아니라 통신·방송·기상·탐사 등 상업적 용도로 확대되었고, 그 용도에 따라 10~100 kg급 Micro 위성 및 10 kg 이하의 Nano & Pico 위성을 개발하려는 노력이 이어지고 있다. 따라서 소형위성의 추진과 자세제어를 위한 새로운 기술의 개발이 요구되며, 그 대안으로서 펄스 레이저를 이용한 추진 시스템을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

레이저 삭마를 기반으로 한 추진은 화학 로켓 추진을 대체할 수 있는 저비용 추진 기술로, 경량화 및 비행 목적에 적합한 추력 제어 면에서 괄목할 만한 성능을 보일 것으로 기대된다. 특히 위성에 소형 레이저를 탑재하여 궤도 및 자세제어에 적용할 경우, 다수의 소형위성을 경제적으로 운용할 수 있게 된다.

기본적으로 레이저 추진은 레이저 조사 시 표면으로부터 운동량을 갖고 있는 원자를 방출함으로써 운동량 보존 법칙에 의하여 추진력이 발생하는 원리를 바탕으로 한다. 이러한 경우 레이저를 조사하는 물질의 종류에 따라 발생하는 추력과 그 특성이 크게 달라진다. 현재까지의 연구에서는 주로 고체 시료에 레이저 빔을 조사하여 시료 표면의 일부 질량이 플라즈마 형태로 배출되는 폭발 과정을 통하여 추력 발생을 유도하였다. 최근에는 액체 시료를 사용할 경우 높은 momentum coupling coefficient (C_m)를 발생시킬 수 있다는 점에서 액체 시료를 추진체, 혹은 추력 향상을 위한 플라즈마 confinement의 용도

로 연구가 진행되고 있다 [2].

Pakhomov *et al.* 은 액체 시료의 흡수계수에 따른 C_m 를 구하고, 금속 시료의 표면에서 발생되는 플라즈마팽창을 제한하여 C_m 값을 최대화할 수 있는 방안을 모색하였다 [2-4]. 또한 Yabe *et al.* 은 추력 향상을 위한 방안으로 WC(water cannon), MFWC (Metal Free Water Cannon), WFC (Water Film Cannon) 등과 같은 다양한 방법을 응용하여, 붕괴로 인하여 발생하는 물의 튀김 효과를 최적화하여 소형 추력기를 추진시켰다 [5-7].

위에 제시된 연구들은 액체 시료를 이용한 레이저 추진의 가능성과 성능 향상의 방안을 제시했으나, 액체 시료의 낮은 점성으로 인하여 연료로 사용할 경우 액체가 흘러나오거나 새는 문제점이 발생할 수 있고 실험 수행에도 어려움이 생긴다. 따라서 젤(gel) 형태의 물질을 사용한 점성에 따른 추력 발생 연구를 소개하고자 한다.

2.1.2 Confinement 물질의 효과 및 비교

레이저 삭마에 의한 추력 발생 원리는 다음과 같다. 펄스레이저가 렌즈를 통과하여 초점을 맞추어 높은 에너지 밀도로 시료의 표면에 조사되면 시료의 표면 온도가 상승하고, 시료의 내부 온도 또한 기화 온도까지 상승하게 된다. 임계점 이상의 고온 고압에 도달하여 시료 표면이 플라즈마 상태로 붕괴되고, 고온 고압의 기체가 팽창해 나가면서 충격파를 형성하게 된다[8].

레이저 삭마는 direct 방식과 confined 방식으로 나누어진다. 레이저에 의한 추력 발생은 모멘텀 보존에 의하여 시료에서 플라즈마 팽창의 반대방향으로 추력이 발생되기 때문에 높은 모멘텀 전달을 요구한다. Fig. 1과 같이 direct 방식은 레이저가 단일 시료 표면에 조사되어 추력이 발생하는 현상이고, confined는 시료의 표면이 투명한 물질로 덮여 있어 플라즈마의 팽창이 제한되어 더 높은 추력을 발생시키게 된다. 플라즈마 팽창을 가두기 위하여 사용되는 물질을 confinement 물질이라고 하며, 이에 가장 적합한 물질을 찾는 것은 같은 에너지를 사용할 때 효

율을 높일 수 있는 방안이 된다.

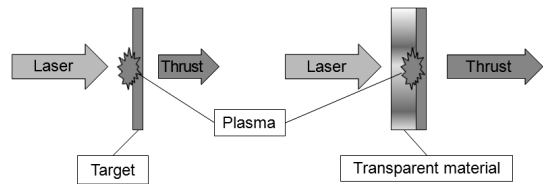


Fig. 1 Mechanism of direct vs confined ablation

실험장치 구성은 Fig. 2와 같다. Nd:YAG 레이저에서 펄스레이저가 조사되면 렌즈를 통하여 높은 에너지 밀도를 갖는 상태로 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 광원으로 하는 photodetector가 검출하여 오실로스코프로 보내게 된다.

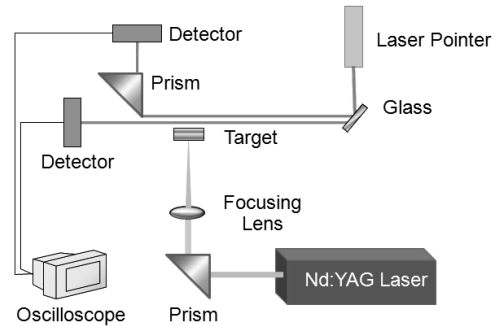


Fig. 2 Schematic of pendulum system

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 C_m 이다. C_m 은 시료에 전달되는 모멘텀을 조사된 레이저의 에너지로 나눈 값으로, 발생된 추력에 비례하는 값이다. 이때 레이저 에너지는 에너지 측정 장치인 power meter로 직접 측정이 가능하고, 따라서 모멘텀을

유도하기 위한 속도를 구하기 위하여 앞에서 설명한 방법대로 TOF의 측정이 필요하며, 시료가 지나간 거리는 측정 장치에서 두 광원 사이의 거리와 같다. 이와 같이 광원 사이의 거리와 TOF를 구하면 C_m 을 도출해낼 수 있다.

Figure 3에서 direct 와 confined의 차이를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 confined 방식 하에서의 C_m 이 direct의 경우보다 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 confinement 물질로 유리(BK7 glass) 보다 물이 월등히 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 젤 형태 물질로 플라즈마 팽창을 제한할 때의 효과를 알아볼 수 있다. 이 결과에서도 direct 와 confined의 추력 발생 효과의 차이가 확연히 나타난다. 특히 물과 젤라틴의 경우를 비교하면 대체로 젤라틴이 물보다 뛰어난 성능을 갖고 있고, 그중에서도 1.2J의 에너지를 사용하였을 경우에는 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 젤라틴의 농도에 따라서도 C_m 값에 큰 변화가 있음을 확인할 수 있다. 각각의 농도에 대해서 같은 조건으로 실험을 수행하였으므로 10% 젤라틴이 2%의 젤라틴보다 좋은 성능을 갖는다는 결론을 내릴 수 있다. 이는 2% 젤라틴의 유동성이 뛰어난 반면 원래 상태로의 회복력이 없으므로, 플라즈마 발생 시 생기는 손상 때문에 투명한 상태가 유지되지 않아 플라즈마 발생으로 인한 손상이 없는 10% 젤라틴보다 낮은 confinement 효과를 갖는 것으로 해석할 수 있다. 또한 젤라틴의 경우 플라즈마 팽창 제한 물질 뿐만 아니라, ablative material로도 사용된다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구의 목적이었던 플라즈마 팽창의 제한에 젤 형태 물질의 사용이 가능함을 검증하였다. Direct보다 confined 방식에 의해 더다. 추력이 발생함을 다시 한 번 검증하였고, 유리와 물, 그리플라방식 2%와 10%플라방식 중 10%플라방식 이 confinement 물질로 가장 우수함을 보였다. fin높은 검총 값을 얻기 위한 최적에 의해, 즉 점도가 존재함을 의미하며, 최적 발생을 적용하여 펄스 레이저 기반에 추력에 의해 장치를 구축할 수 있다in점을 시사한다. 특히추

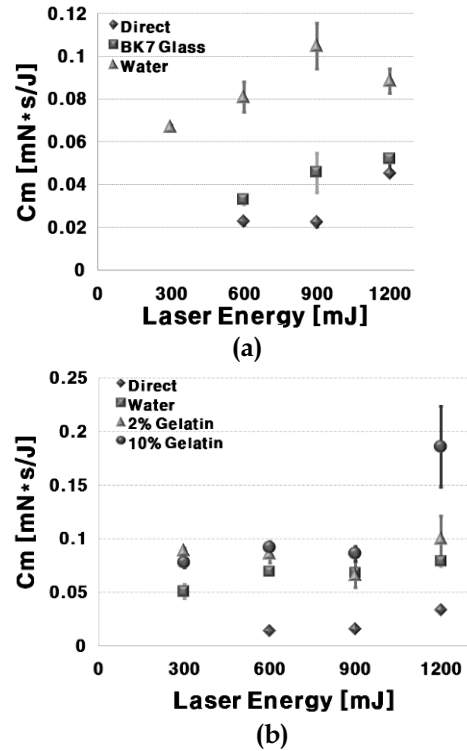


Fig. 3 Comparison of laser thrust due to varied confinements

력이 레이저 에너지를 사용하였을 경우 confinement 물질이 가능 5배가량에 추력에%플해 향상을 이끌줄 념으로써, 레이저 추진의 잠재력과 실현 가능성을 검증하였다.

2.2 펄스 추진기술을 활용한 첨단 약물전달

2.2.1 마이크로/나노 입자 가속

레이저 삭마에 의해 플라즈마 및 충격파가 발생하는 과정을 얇은 금속판을 대상으로 적용하면 마이크로/나노 크기의 미세한 입자를 3000 m/s 이상의 아주 빠른 속도로 가속시킬 수 있고, 그 원리는 다음과 같다.

고 에너지를 지닌 레이저 빔이 얇은 금속 판 위에 집중되면 플라즈마의 팽창에 의해 충격파가 발생하고, 이 충격파는 4000 m/s이상의 극초음속의 속도로 전파해 나가게 된다. 충격파는 얇

은 금속판을 통과하다 반대 면에서 팽창파로 반사된다. 이는 금속과 공기와의 Acoustic Impedance의 차이 때문이다[9]. 이러한 과정에서 금속판은 순간적인 힘(Shock loading)을 받아 Fig. 4와 같이 국부적인 변형을 하게 되고, 이로 인해 반대 면에 코팅되어 있는 마이크로/나노 입자들이 튕겨져 나가게 되어 입자가속 시스템을 구축할 수 있다.

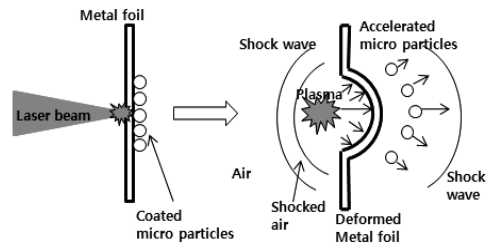


Fig. 4 Micro/nano particles accelerated by shockwave

2.2.2 약물 전달 시스템으로의 적용

위와 같은 레이저와 물질 간의 상호작용에서 발생하는 충격파를 이용하는 마이크로/나노 입자 가속 시스템을 새로운 약물 전달 기술로서 응용할 수 있다. 고체 가루 형태의 약물을 가속시켜 인체 내에 직접 투입하여 원하는 치료효과를 얻어낼 수 있도록 약물가루를 가속시켜 인체 내에 침투시키는 장치를 Biolistic (Bio-ballistic) gun이라 한다[10].

일반적인 약물 전달 방법과 달리 충격파를 이용한 방식에는 다음과 같은 장점들이 있다. 피부의 뚫음보다도 작은 크기의 미세한 약물 입자를 사용하므로 약물을 투여 받는 사람은 통각을 유발하는 크기보다 작은 약물을 사용하여 고통을 느끼지 않기 때문에, 전통적인 바늘을 사용한 주입에 거부감을 가지는 환자들에게도 적합하게 사용할 수 있다. 게다가 충격파를 이용한 약물 전달 방식은 바늘이나 오염된 도구에 의한 감염 위험을 현저하게 줄일 수 있고, 약물 투여 부위에 피가 나지 않게 할 수 있다. 또한 마이크로/나노 형태로 제조될 수 있는 다양한 약물 가루들을 실용적으로 표층에 전달하는 것이 가능해지고, 이 장치를 소형화하여 내시경과 같은 기존

의 의학 기구들과의 호환을 이룰 수 있는 시스템을 설계한다면 접근이 힘든 인체 내부로의 국소적인 약물투여를 가능하게 하므로 약물 전달 기술에서의 혁신이 될 수 있다.

2.2.3 Biolistic gun의 개발 현황

최대 3 J/pulse의 에너지를 낼 수 있는 고출력 Nd:YAG 펄스 레이저 등의 장비를 이용하여 레이저 시스템을 구축하였다. 이를 이용하여 마이크로/나노 입자 가속 시스템을 구축하여 입자의 인체조직으로의 침투 깊이와 분포에 대한 제어성을 마련하기 위한 연구를 진행하고 있다. 여러 종류의 실제 약물 가루들을 가속시켜 임상에 적용하기 이전에, 인체의 피부를 모사하는 2% 젤라틴 수용액(냉장보관 1 hr)에 5 μm 지름의 코발트 가루와 1 μm 지름의 구리 가루를 침투시켜 Biolistic gun의 역학적인 기반을 마련하는 연구를 진행하고 있다.

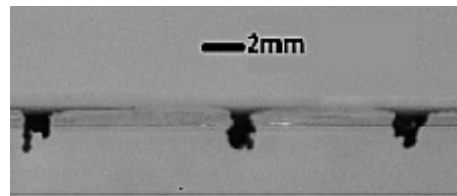


Fig. 5 Micro particles penetrated into 2% gelatin solution

Biolistic gun을 이용하는 약물전달에서 약물 입자의 관통력과 침투 분포 형상은 최적의 추력이 발생될 수 있도록, 즉 플라즈마 팽창 제한 물질·레이저 에너지의 강도 등 여러 가지 변수들을 조절함으로써 제어 가능한 것으로 보고 있고, 현재 이러한 여러 변수들의 영향을 파악하기 위한 실험을 진행하고 있다. 젤라틴을 이용한 실험 데이터베이스 구축 및 실제 임상에 적용할 수 있도록 하기 위한 방안으로 적절한 약물을 선정하여 실험용 동물의 연조직에 침투시키는 실험을 진행 중에 있다.

3. 에너지원 및 점화원으로서의 펄스에너지 응용

3.1 Implosion을 이용한 그린에너지 획득

환경에 대한 관심과 더불어 친환경 에너지의 개발 의지가 고조되고 있는 가운데, 레이저에 의한 충격파 발생을 기반으로 한 에너지 생성의 가능성이 대두되고 있다.

따라서 고 출력 레이저를 이용하여 친환경적인 그린에너지를 획득하는 방안을 모색하고자 물속의 버블 붕괴에 의해 발생하는 이차 충격파에 관한 연구를 진행하고 있다. 고 출력 레이저를 광섬유를 이용하여 고압의 밀폐된 용기내의 물에 조사시키면 일차 충격파와 함께 버블이 발생한다. 이렇게 발생한 버블은 버블 내부의 일차 충격파에 의한 잔재 에너지로 인해 팽창해 나간다. 버블들은 최대 크기(약1.45 mm)로 팽창한 후 주위의 물의 압력에 의하여 버블 안쪽으로 힘을 받는다. 이러한 역 운동은 아주 짧은 시간에 이루어지고 갑작스러운 역 운동은 버블의 붕괴를 일으킨다. 버블 붕괴에 의해 버블 내부의 순간 압축된 공기들이 밖으로 진행하면서 소음과 함께 고 압력을 발생시킨다. 이것이 이차 충격파이다. 이차 충격파가 발생시키는 압력은 일차 충격파에 비해 대략 100~1000배 이상 높은 압력이다. 이와 같은 과정으로 펄스레이저에 의해 발생하는 이차 충격파 에너지를 운동에너지로 전환하여 사용할 수 있다. 이러한 에너지는 연료가 필요 없이 물만으로도 에너지를 얻는다는 점에서 친환경적이며 획기적인 새로운 에너지 생성의 방안이라고 할 수 있다.

실제 엔진 컨셉으로 개발되고 있는 임플로전 기반의 실린더(15 mm×30 mm)는 Fig. 6과 같으며, SI 엔진(스파크 점화 엔진)과의 제원 비교는 Table 1에서 나타내고 있다. 여기서 SI 엔진의 성능은 실제 SI 엔진(2000 cc)의 한 실린더(500cc)의 출력으로 나타내었다. 또한 SI 엔진과 임플로전 엔진의 원리는 Fig. 7과 같다.

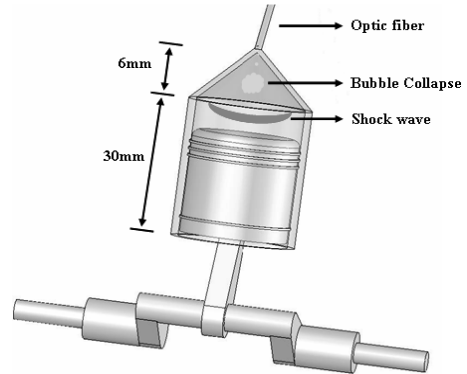


Fig. 6 Schematic of implosion cylinder

Table 1. Specifications of SI and Laser Induced Engines

	SI Engine	Implosion Engine
Cylinder	500 cc	3 cc
Piston head diameter	100 mm	10 mm
Force	7450 N	322 N

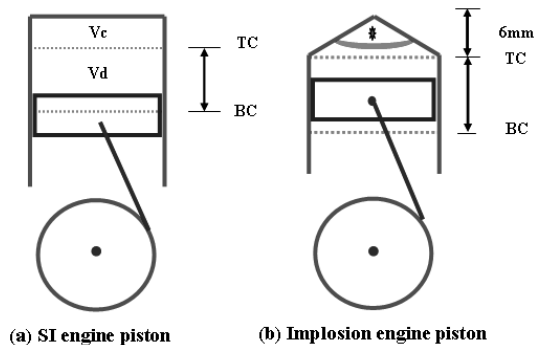


Fig. 7 SI and Implosion engine comparison

SI엔진에서 100 mm의 피스톤 헤드 지름을 갖는 500 cc의 실린더를 통하여 발생하는 힘은 다음과 같다.

$$\text{BMEP} = \frac{P \times n_R}{V_d \times \text{rpm}} = \frac{20 \times 10^3 \times 2}{0.5 \times 5000/60} = 960 \text{ kPa}$$

$$F = \text{Pressure} \times \text{Area} = \text{BMEP} \times \frac{\pi}{4} B^2$$

$$= 960 \times 10^3 \times \frac{\pi}{4} \times 0.1^2 = 7450 \text{ N}$$

여기서, BMEP는 제동평균유효압력, P는 power, B는 피스톤 헤드 지름, V_d 는 실린더의 체적, n_R 은 4개의 실린더에서 2의 값을 갖는다.

또한 임플로전에 의해 발생하는 이차 충격파에서 생성되는 구동력으로 피스톤에 전달되는 힘은 다음과 같다. 이 때 구동력을 최대화 하기 위해 피스톤은 레이저 조사 부위를 중심으로 하는 8 mm의 곡률 반경을 갖는다.

$$F = \text{Pressure} \times \text{Area}$$

$$= \text{focal pressure} \times \frac{2}{3} \pi R^2$$

$$= 2.4 \times 10^6 \times \frac{2}{3} \pi \times 0.008^2 = 322 \text{ N}$$

여기서 R은 레이저 조사점으로부터의 곡률 반경을 나타낸다. 압력은 Fig. 8에서와 같은 장치를 이용하여 측정한다.

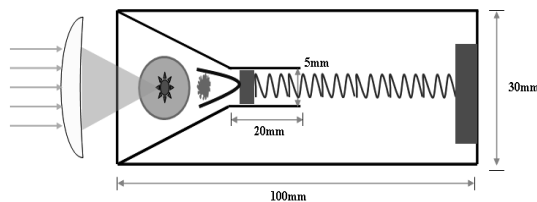


Fig. 8 Bubble induced secondary shockwave pressure transducer

비록 임플로전 엔진의 구동력 322 N은 실제 SI엔진에 의해 발생하는 구동력 7450 N에 비해 상당히 작지만, 본 엔진의 피스톤 면적이 SI 엔진의 약 1/60이라는 점에서 발생하는 힘은 결코 작은 힘이 아니다. 무엇보다 임플로전 엔진은 연료와 오염 물질 없이 순수한 물만으로 상당한 힘을 얻는다는 점에서 친 환경적이며 획기적인 연구라고 할 수 있다.

이러한 연구를 발전시켜 임플로전 엔진을 실제 엔진의 크기와 비슷하게 제작하여 하나의 피스톤에 여러 개의 레이저 조사점을 만들어 동시에 implode 된 이차 충격파의 에너지를 이용하여 피스톤을 구동시켜 운동에너지를 얻는다.

3.2 펄스에너지에 의한 가열 및 폭발의 점화

3.2.1 가열 및 점화 원리

도구의 개념을 넘어서 에너지원으로서의 레이저에 관한 매우 다양한 연구가 진행되고 있다. 이에 발맞추어 미국에서는 National Ignition Facility (NIF)를 구축하여 레이저원의 활용에 관한 다양한 연구가 가능하게 되었다. NIF가 진행하는 레이저 응용 연구는 크게 3가지로 나누어진다. 첫째는 레이저를 이용한 플랜트를 건설하여 에너지 생산을 하는 것이고, 두 번째는 안전을 위한 방위 체계에 사용하는 것이다. 또한 나머지 하나는 우주 연구에 활용하여 우주의 생성 과정을 밝혀 나가는 것이다. 여기서 중요한 것은 이러한 레이저 연구에 사용되는 레이저는 수 백 J을 상회하는 에너지를 가진 HEL (High Energy Laser)급 레이저라는 것이다. 현재 레이저 연구에 있어서 이러한 고출력 레이저를 이용한 기본 연구는 진행되어오지 않았다. 따라서 고출력 레이저의 물리적 현상을 연구하여 이를 응용하는 연구는 그 가치를 인정할 수 있다.

펄스 당 긴 조사 시간(>nano second)을 가진 레이저를 어떠한 고체 표면에 조사하면, 표면에서 온도는 급격히 기화 온도에 도달하게 되고 상변화가 일어난다. 그리고 고체의 물질이 기화되고 표면에서는 빈 공간이 생성된다. 기화된 기체는 빠른 속도로 팽창하고 높은 압력을 형성하며, 충격파를 발생시킨다.

레이저가 조사된 고체 표면에서 증가한 열은 후면으로 전도되어 후면에 인접한 고에너지 물질에까지 그 열이 전달되어 점화가 이루어진다. 실제로 레이저 물질 조사에 의한 고에너지 물질의 점화에는 몇 가지 경우가 존재한다. 그 중 하나는 앞서 언급한 열전도에 의한 점화를 들 수

있고, 둘째는 레이저에 의하여 구멍이 생기고 레이저가 직접 폭약과 접촉하여 점화가 이루어지거나, 혹은 구멍이 생성되는 과정레이저가 직접 충격파가 전달되어 폭발 충격 할 수 있다. 또한, 구멍이 뚫리면서 방출된 입자에 의하여 폭발이 이루어 질 수 있다.

3.2.2 레이저 점화 모델

가열 및 점화 현상 모델링을 위하여 밀리초급 고에너지 펄스 레이저(HEL)를 가로 50.8 mm, 세로 127 mm, 두께가 1.5 mm 인 steel 4340 시편에 조사한다 (Fig. 9).

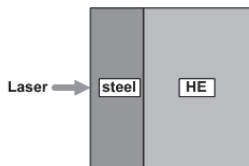


Fig. 9 Problem set up for steel-RDX composite

사용된 펄스 레이저의 출력 에너지는 500 J/pulse이고, 펄스 지속시간은 0.5 ms 이다. 조사된 부위의 spot size는 5 cm²이므로 laser fluence는 100 J/cm²이다[11]. 레이저의 frequency는 20 Hz이다. 또한 열전달에 의한 점화현상을 보기 위해 RDX라는 폭약을 사용하였다.

Figure 10은 지름이 1 cm 이고 높이가 6.4 mm인 원통형 폭약에 10 W/cm² ~ 1000 W/cm² 인 연속적인 CO₂ 레이저 출력 범위에서 출력값을 바꿔가며 조사하였을 때 폭발이 일어나는 시간을 측정한 실험이다[12].

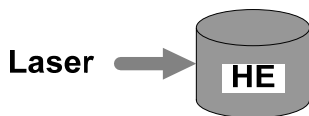


Fig. 10 Schematic of laser ignition of HE pellet

위의 원통형 폭약의 폭발실험을 바탕으로 RDX[13,14]와 TATB[15,16]의 3-step 열분해 메커니즘을 구축하고, HMX[15,16]를 위해 4-step 메커니즘을 완성한다. Steel은 레이저의 복사 에너지를 흡수하여 가열되기 시작하고, 그 열은 steel 내부를 따라 전달되성한steel 후면에 도달하게 된다. 레이저 물다.가열 실험[11]에서는, 두께가 1.5 mm인 steel 시편에 펄스당 100 J/cm² 에너지를 가진 레이저를 5 펄스 조사하섰한steel 후면에서의 온도를 측정하였다. Fig. 11은 5 펄스를 조사하였을 때의 steel 전면부에서 계산된 온도 결과를 나타낸다[17]. 5 펄스를 조사함에 있어 총 5개의 피크점을 확인할 수 있다.

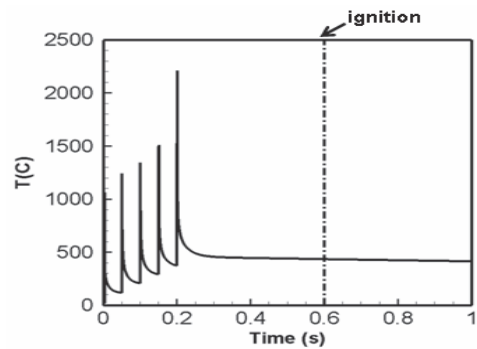


Fig. 11 Calculated temperature profile of steel coupon - front side

레이저 물질 조사 가열에 의한 고에너지 물질의 점화 모델은 군사적 목적에 부합시켜 다음에 제시할 레이저 킬과 같은 레이저를 이용한 우주 파편 제거나 미사일 요격 시스템에서 유용하게 적용될 수 있다.

4. 우주무기 및 우주 파편 제거용 도구로의 응용

4.1 레이저 킬 (Laser kill)의 우주무기 가능성

4.1.1 레이저 킬 시스템 개발 현황

레이저가 추진 시스템에 적용되고, 점화 및 에너지원으로서의 사용 가능성이 부각됨에 따라

우주 공간에서 다양한 분야로의 레이저 응용을 고려하고 있다. 응용 방안의 한 예로 펄스 레이저를 적용한 우주 무기의 구축을 들 수 있다.

레이저 킬이란 고출력 레이저를 이용한 군사적 전술·전략을 의미한다. 레이저 빔이 초속 30만 km의 광속으로 직진하므로 이론적으로 가장 신속한 대응이 가능하고, 동일 효과 무기체계에 비해 1회 발사비용이 매우 낮다는 장점이 있어 활발한 연구가 진행될 전망이다. 또한 저출력을 이용한 목표물의 센서 등의 무력화에서부터 최대 출력으로 목표물을 완전히 파괴시키기까지 출력 조절에 의한 파괴력 제어가 가능하다는 이점도 가지고 있다.

고에너지 레이저와 관련된 연구 분야는 이를 응용한 무기체계 개발에 대한 기대로 인하여 미국을 중심으로 각국의 군사연구소에서 다양한 연구개발이 이루어지고 있다. 미국은 1970년대부터 시작된 고에너지 레이저 연구를 바탕으로 1983년부터 ‘별들의 전쟁’(Star Wars), 노틸러스(Nautilus)계획 등을 거쳐 레이저 무기를 꾸준히 개발해 왔다. 현재까지 레이저 무기 체계를 응용하여 1989년 마하 2 이상으로 비행하는 Vandal 미사일 격추, 1996년 Katyusha 로켓 요격, 2002년 450 m/s 속도의 152 mm 포탄 요격 등의 시험을 성공시켰다. 이러한 성 군사바탕으로 가까운 미래에 고에너지 레이저 무기를 실전배치할 수 있을 것으로 전망하고 있다.

한편 미국 이외의 개발 국가로는 러시아와 중국, 유럽 국가들이 레이저무기를 개발하고 있는 것으로 알려져 있다.

미국은 요구되는 임무에 따라 다양한 플랫폼에 신속히 설치할 수 있는 소형 레이저 개발을 목표로 HELSTAR (High Energy Laser System-Tactical Army)라는 고에너지 레이저 체계 사업을 추진하고 있으며, 이는 다시 THEL(Tactical High Energy Laser)와 MHEL(Mobile HEL)로 세분된다. 최근 고에너지 고체 레이저로부터 발생된 열을 신속하게 외부로 방출시키는 기술이 발전됨에 따라 고에너지 레이저 무기체계가 가까운 미래에 실전 배치될

가능성이 매우 높아졌다. 이러한 레이저 무기체계는 단거리 대공방어에서부터 지뢰 제거에 이르기까지 다양한 전술적 응용에 적용이 가능하다. 고출력 레이저 개발의 주요 핵심과제는 비교적 소형 크기의 이동형 시스템을 통해 고에너지를 갖는 레이저빔 펄스를 출력시키는 것이며, 이는 향후 미 육군의 주력 이동형 대공방어 무기체제로 전력화 될 예정이다. 이러한 대표적인 사례로 현재 개발 중인 AC-130 Gunship의 경우 그 상용화를 목전에 두고 있다.

또한 이러한 고출력 레이저를 장착한 위성을 발사하여 우주에서 레이저를 이용한 우주과편의 요격이나 다른 위성체를 요격하기위한 우주 무기로서의 가능성을 가지고 미래형 레이저 우주 무기의 개발 또한 구상 중에 있다.

4.1.2 레이저 빔 제어 연구

독자적으로 개발한 state-of-the-art 다물질 multi-physics 툴에 의한 모델링과 HEL 목표 레이저를 사용한 레이저 킬 연구가 진행되고 있다. 실험에 사용되는 고출력 CO₂ 레이저의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specification of Mock-up HEL

Pulsed Frequency	~ 100kHz
Power Range	10 ~ 300 Watts
Peak Power	720 Watts
Wavelength	10.4 ~ 11.2 μ m

빔 품질(beam quality)은 레이저 무기의 성능에 있어서 매우 중요한 요소이다. 빔 품질에 따라 수백 km에 있는 센서 파괴까지 가능해진다. 우선 레이저의 빔 분포 형상에 따른 steel의 가열 특성을 살펴보고자 펄스 당 500 J의 에너지를 갖고 펄스 지속시간이 0.5 ms 인 레이저의 TEM00 모드의 레이저 빔 분포 형태와 TEM10 모드의 레이저 빔 분포 형태를 참고 문헌 [18]을 바탕으로 Fig. 12와 같이 구할 수 있다. 또한 시

간에 대한 분포는 일반적으로 많은 분포 형태를 가지는 Gaussian 형태로 가정 한다.

Figure 12의 레이저 빔 분포 형태를 이용하여 10 mm의 두께를 가지는 steel을 가열하여 두 모드가 가지는 열전달 특성을 살펴볼 수 있다. Fig. 13은 모드별 가열 문제의 개략도이다.

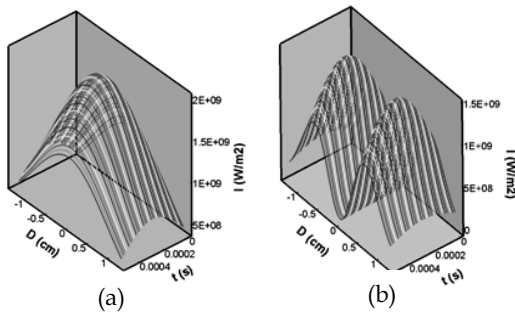


Fig. 12 Laser beam profiles : (a) TEM00 (b) TEM10

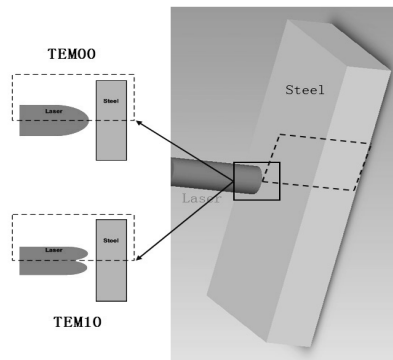


Fig. 13 Schematic of laser heating with TEM00 and TEM10 modes.

TEM00 모드와 TEM10 모드의 빔 분포 형태를 가지는 레이저에 의한 두께 10 mm의 steel 가열 과정은 Fig. 14에 나타내었다. TEM00의 경우 하나의 피크점으로 인한 steel 내부의 열전달이 나타나고 있으며, TEM10에서는 두 피크 점을 형성하는 빔 분포 형태로 인한 열전달 분포를 명확히 나타내고 있는 것을 볼 수 있으나 넓은 에너지 분포로 인해 최고 온도는 TEM00 보다 낮게 형성되는 것을 볼 수 있다.

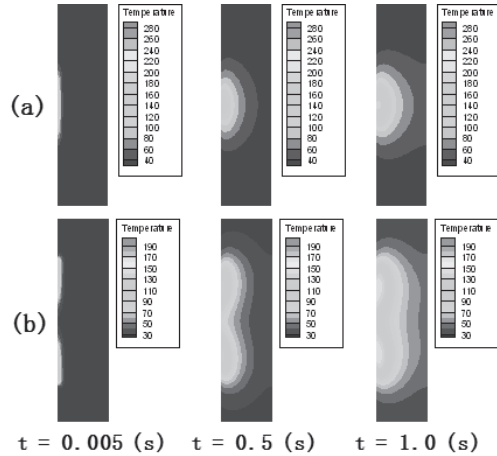


Fig. 14 Temperature profiles of Laser heating : (a) with TEM00, (b) with TEM10

실제로 레이저는 사용자의 목적과 의도에 맞게 다양한 빔 에너지의 분포 형태를 가질 수 있다. 그중 일반적으로 정형화된 레이저의 빔 분포 형태는 TEM 모드에 의하여 결정되는데, 이는 레이저 모드에 따른 열전달 특성이 고에너지 물질의 집화 특성과 밀접한 관계를 가지며, 가열 물질의 두께와도 연관이 되어 있음을 나타낸다.

실제 대기에서의 레이저 조사는 thermal blooming[19]이 발생하는데, 우주의 환경을 고려한다면 이러한 thermal blooming의 효과를 무시할 수 있으며 현재의 가열 모델의 신빙성을 더해 줄 수 있다. 따라서 본 연구를 기반으로 우주에서 적용 가능한 레이저 킬 무기체계 개발이 가능함을 시사한다.

4.2 Laser Induced Breakdown Spectroscopy를 이용한 달 탐사

4.2.1 우주 탐사 장비의 국외 기술 개발 현황

위성에 레이저를 탑재할 경우 추진을 이용한 자세제어와 에너지원, 그리고 무기체계로의 활용 방안 외에 우주 탐사 장비로서의 활용 가능성이 있다. 우선 각국에서 현재까지 진행해왔던 우주 탐사 개발 현황은 아래와 같다.

1960년부터 미국은 Surveyor Program을 통해

7개의 달 탐사 장비를 이용하여 달 표면을 탐사하였다. Surveyor 1-3호는 약 한 달에 1000개의 달 표면 사진을 촬영을 하는데 성공하였다. 이후 Surveyor 5-7은 달 표면의 성분을 분석하였고 [20], 특히 Surveyor 5호는 달 표면의 현무암을 분석하여 달에서 melting의 흔적을 발견하였다. 이후 미국의 Apollo mission이 1960년대부터 1970년도 까지 이루어졌다. Apollo mission은 이전의 Surveyor program과 달리 다수의 달 탐사 장비를 발사하여 달 표면의 토양이나 돌을 채취하여 지구로 다시 보냈다[21]. 미국과 함께 우주 탐사의 강국인 구소련은 1960년부터 달의 표면 및 궤도에서의 우주환경까지 조사할 수 있는 장비를 탑재한 Luna mission을 수행하였다. Luna mission중에 Luna 16, 20과 24는 달에 착륙한 후 7분 동안 드릴을 이용하여 달 표면을 350mm 깊이만큼 채굴 한 뒤 달 표면의 샘플분석 결과를 지구로 보냈다[22]. 이는 미국의 Surveyor program보다 앞선 기술이었다. 이후 미국, 구소련, 일본 및 유럽 연합 국가들의 활발한 연구를 통해 무인 달 탐사 장비를 개발하였다. 달 탐사를 통해 습득한 기술력을 바탕으로 우주 선진국들은 화성을 비롯한 다른 행성의 탐사에 대한 연구를 수행하고 있다. 지금까지 화성 탐사 장비로는 미국의 Viking Lander가 가장 대표적이다 [23]. 이는 화성의 토양 및 대기의 성분을 분석하며 생명체의 흔적을 조사하였다. 이후 미국, 러시아, 일본, 유럽 연합 국가 등을 중심으로 LIBS기술을 응용한 우주 탐사 장비가 연구·개발되고 있다. 이후 미국은 Beagle-2 lander와 NASA's Sojourner의 화성 탐사 장비를 화성에 보냈다.

가장 최근에는 LIBS장비를 탑재한 Mars Exploration Rover가 화성의 생명체 및 물의 존재 흔적 여부 확인과 토양과 기후의 성분 분석 그리고 인간의 화성 탐사를 위해 사전 작업의 목적을 가지고 2003년에 화성에 보내졌다. 또한 NASA는 Fig. 15와 같은 Mars Science Laboratory Rover (MSLR)를 2009년 10월에 다시 화성에 보낼 계획이었지만 MSLR는 하드웨어

문제 및 모의 성능 실험과정에서 여러 가지 문제점을 드러냈다. 이로 인해 NASA는 기술적 문제들을 완벽하게 보완하여 2년 후인 2011년에 발사하기로 하였다[24]. 이와 함께 유럽 연합은 ESA's ExoMars Rover를 연구 개발 중에 있다 [25].

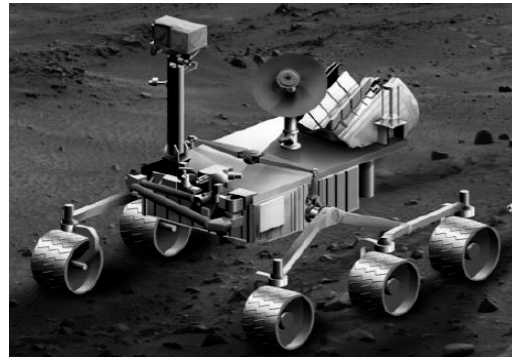


Fig. 15 LIBS in use by Mars Rover (by NASA)

4.2.2 국내 연구 개발의 필요성

미국, 러시아 및 일본 등의 우주 강국과 달리 국내에서의 우주 달 탐사 장비에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 인공위성을 우리 기술로 만들어 발사하는 것에 그치지 않고 미래의 우주 산업에서 경쟁력을 획득할 수 있는 길은 우주 탐사 장비 개발에 있다. LIBS 원리를 이용한 달 탐사 장치를 개발하여 달 표면의 성분을 분석하는 데에 역량을 발휘하고자 한다. 두 가지 형태의 LIBS 탑재체를 제작함으로써 달의 표면과 궤도에서의 우주환경 탐사가 가능하며, 이를 토대로 추후 화성을 비롯한 다른 우주 행성의 성분 분석에 이용될 수 있는 혁신적인 장치가 될 수 있다.

4.2.3 보유 기술

레이저를 사용하여 다양한 주위 환경에 따른 플라즈마 및 파열 현상에 대한 원천기술연구를 수행하여왔다. 이러한 다양한 실험을 통해 레이저 빔과 시료의 나노초급 단위에서의 반응 및

플라즈마와 공기과열 현상에 대해서 규명하였으며, 레이저-물질 현상을 통합적으로 해석할 수 있는 전산기법을 개발하여왔다. 탐사용 탑재체에 적용될 LIBS의 기본적 원리를 이해하고자 위에 언급한 선행연구는 필수조건임을 확인하였다.

LIBS는 고 출력의 레이저를 사용하여 일종의 방전 현상인 과열을 발생시켜 생성되는 플라즈마를 여기원으로 사용하는 분광 분석법이다 (Fig. 16). 레이저에 의해 유도된 플라즈마 속에서 시료는 충분히 증기화 되어 원자화 및 이온화되고, 흡수된 에너지에 의하여 원자 및 이온은 여기 상태로 존재할 수 있다. 여기 상태의 원자 및 이온은 일정 수명 이후 에너지를 방출하며 다시 바닥상태로 돌아가는데 이때 방출되는 에너지는 원소의 종류 및 여기 상태(첫 번째 여기 상태, 두 번째 여기 상태 등)에 따라 고유의 파장을 방출한다. 이때 방출되는 파장의 스펙트럼을 해석하면 구성 물질을 정성 및 정량적으로 분석할 수 있다 (Fig. 17).

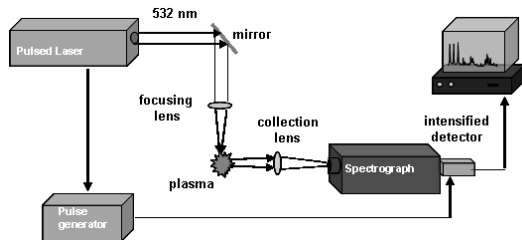


Fig. 16 Schematic of LIBS

LIBS의 가장 큰 장점은 성분 분석 시간이 짧아 실시간 분석이 가능하다는 것이다. 또한 국부적 영역을 이동하며 분석할 수 있기 때문에 화학 조성 분포 조사도 가능하다. LIBS의 가장 큰 매력은 극 환경에서 온라인 분석이 가능하며 기체, 액체, 고체의 모든 물질의 성분 분석이 가능하다는 점이다. 또한 도체 및 부도체에 모두 적용 가능하다. 이러한 장점들을 바탕으로 LIBS가 달 탐사 장비로써 가장 적합하다고 할 수 있다.

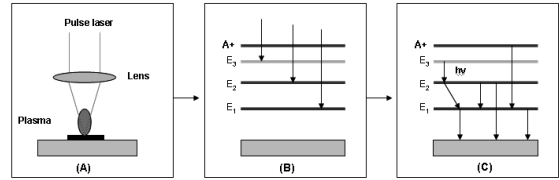


Fig. 17 Mechanism of component analysis using LIBS

4.2.4 기대성과 및 활용

우리나라는 2020년에 달 탐사 인공위성을 발사할 계획을 가지고 있다. 이 달 탐사 인공위성의 성공적인 발사 및 임무수행에 있어서 달 탐사 장비에 대한 기초 연구는 매우 큰 의미를 갖는다. 본 연구팀이 개발 중인 탑재체 시스템 관련 기술을 통하여 달 이외의 다른 행성의 지질 구조 및 성분을 분석할 수 있으며, 생명체의 존재 및 흔적을 정밀 조사할 수 있다. 화성 탐사에 사용된 LIBS 방식의 탑재체를 달에 적용하는 기술의 국산화는 우주기초원천기술개발에 꼭 필요한 부분임이 확실하다. 본 연구에서 개발 중인 탐사용 탑재체는 우주기초원천기술개발분야 외에도 (i) 남극이나 북극과 같은 극한 환경에서의 원격 조정을 통해 광물을 채취하거나 성분을 분석할 수 있는 수단이 되며, (ii) 심해에서도 레이저를 사용한 해양 지질 탐사에 응용될 수 있다.

5. 결 론

이처럼 펄스 에너지를 활용한 다양한 연구는 Propulsion & Power 분야에 있어서 비용 절감과 소형화 등 새로운 가능성을 시사한다. 레이저 추진을 이용한 소형 위성의 추진 및 자세제어는 화학 로켓을 대체할 수 있는 저비용의 추진 기술로 적용될 수 있다. 특히 자세제어를 위해 위성에 탑재되는 연료의 중량과 연료량이 위성의 수명을 결정한다는 점을 감안할 때, 레이저와 광학기기로 연료를 대체하여 많은 이득을 얻을 수 있게 된다. 뿐만 아니라 위성체에 탑재된 펄스

에너지를 활용하여 다양한 임무를 동시에 수행할 수 있다는 최대 강점을 본문을 통하여 확인하였다. 공학과 의학을 접목시킨 충격파에 의한 약물전달은 약물 투여 방법에 획기적인 변화를 불러올 것이며, 레이저를 에너지원으로 사용하여 우주에서 사용 가능한 레이저 킬 무기체계 구축이 가능해진다. 또한 정확하고 신속한 LIBS 성분 분석법에 의한 우주 탐사는 선진 우주 강국으로 도약하기 위한 발판을 마련해 준다고 할 수 있다.

따라서 아직 국내에서 연구가 본격적으로 진행되지 않은 펄스 에너지 활용 연구를 바탕으로, 새로운 개념의 에너지원으로서 레이저를 적용할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

후 기

본 특집 논문을 작성하는데 도움을 주신 서울대학교 익스트림에너지 연구실의 연구원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A. R. Kantrowitz, 1972 "Propulsion of orbit by ground based lasers," *Aeronautics and Astronautics*, Vol. 9, No. 3, pp.40-42
2. J. Sinko and A.V. 2008 Pakhomov, "Laser propulsion with liquid propellants Part I: an overview," *AIP Conference Proceedings* 997, pp.195-208
3. J. Sinko and A.V. Pakhomov, 2008 "Laser propulsion with liquid propellants Part II: thin films," *AIP Conference Proceedings* 997, pp.209-221
4. J. Sinko and D.A. Gregory, 2007 "Vaporization - Driven impulse generation for laser propulsion," *AIAA Paper* 2007-5601
5. T. Yabe, C. Phipps, K. Aoki, M. Yamaguchi, R. Nakagawa, C. Baasandash, Y. Ogata, M. Shiho, G. Inoue, M. Onda, K. Horioka, I. Kajiwara, and K. Yoshida, 2003 "Laser driven vehicle-from inner-space to outer-space," *Appl. Phys.* A77, pp.243-249
6. T. Yabe, H. Ohzono, T. Ohkubo, C. Baasandash, M. Yamaguchi, T. Oku, K. Taniguchi, S. Miyazaki, R. Akoh, Y. Ogata, B. Rosenberg, and M. Yoshida, 2004 "Proposal of liquid cannon target driven by fiber laser for micro-thruster in satellite," *AIP Conference Proceedings* 702, pp. 503-512
7. T. Ohkubo, T. Yabe, S. Miyazaki, C. Baasandash, K. Taniguchi, A. Mabuchi, D. Tomita, Y. Ogata, J. Hasegawa, and K. Horioka, 2005 "Laser propulsion using metal-free water cannon target," *AIP Conference Proceedings* 766, pp.394-405
8. J. J. Yoh et al, H. H. Lee, J. H. Choi, K. C. Lee, and K. H. Kim, 2008 "Ablation induced explosion of metal using high power Nd:YAG laser," *J. Appl. Phys.* Vol. 103, No.5
9. V. Menezes, K. Takayama, T. Ohki, and J. Gopalan, "Laser ablation assisted micro particle acceleration for drug delivery," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, No. 163504, 2005
10. J. H. Choi, A. B. Gojani, H. H. Lee, and J. J. Yoh, "Development of bio-ballistic device for laser ablation induced drug delivery," *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing*, 9(3), 2008
11. C. D. Boley, A. M. Rubenchik, "Modeling of high-energy pulsed laser interactions with coupons," *LLNL Technical Report*, 2003, UCRL-ID-151857
12. A. N. Ali, S. F. Son, B. W. Asay, M. E. Decroix, "High-irradiance laser ignition of explosives," *Combustion Science and*

- Technology, 175, 1551-1571, 2003
13. J. J. Yoh, M. A. McClelland, J. L. Maienschein, J. F. Wardell, and C. M. Tarver, "Simulating thermal explosion of RDX-based explosives: model comparison with experiment," *Journal of Applied Physics*, 97, 083504, 2005
 14. 이경철, 김기홍, 여재익, "고출력 레이저에 의한 가열과 폭약의 점화 모델링," *한국추진 공학회지*, 제12권 3호, 2008, pp.1-8
 15. C. M. Tarver, "Chemical kinetic modeling of HMX and TATB laser ignition tests," *Journal of Energetic Materials*, 22, 93-107, 2004
 16. J. J. Yoh, M. A. McClelland, J. L. Maienschein, A. L. Nichols, and C. M. Tarver, "Simulating thermal explosion of HMX-based explosives: model comparison with experiment," *Journal of Applied Physics*, 100, 073515, 2006
 17. K. C. Lee, K. H. Kim and J. J. Yoh, "Modeling of high energy laser ignition of energetic materials," *Journal of Applied Physics*. Vol. 97, No.083536, 2008
 18. H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Applied Optics* Vol. 5, No.10, 1966
 19. D. C. Smith, "High-power laser propagation: thermal blooming," *Proc. of the IEEE*, Vol. 65, No.12, 1977
 20. USCFC: Robotic U.S.Mission to the Moon. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1966-045A>, December 14, 2007
 21. Allton, Judy: "Catalog of Apollo Lunar Surface Geological Sampling Tools and Containers," NASA Johnson Space Center Document JSC-23454, 1989
 22. The National Space Data Center(NSSDC): <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1966-116A> The Luna 13. October 15, 2007
 23. The National Space Data Center(NSSDC):Chronology of Mars Exploration. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1975-075C>, December 12, 2007.
 24. NASA JPL: Mars Exploration Rover Mission's Science web site. - <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/science/>, December 12, 2008
 25. Concept Evaluation of Mars Drilling and Sampling Instrument. by Matti Anttila, book, March, 2005