10. 학사논문 지도교수: 여 재 익

10-1. 탄소성거동을 고려한 연소폭발천이 현상 연구 (곽민철)

10-2. 연소 모델링 및 고에너지 열유체 전산 해석 (김보훈)

10-3. DSC 기반 반응속도식 구축 연구 (김유천)

10-4. 차세대 우주추진 체계 개발을 위한 FSI 해석 (이영헌)

10-5. Fireworks 모델링 및 전산 해석 (김민성)

10-6. VISAR를 이용한 입자 속도 측정 (유현주)

10-7. 무통증 LASER 주사기 시스템 개발 (장헌재)

10-8. LASER를 이용한 타투 시스템 개발 (여성구)

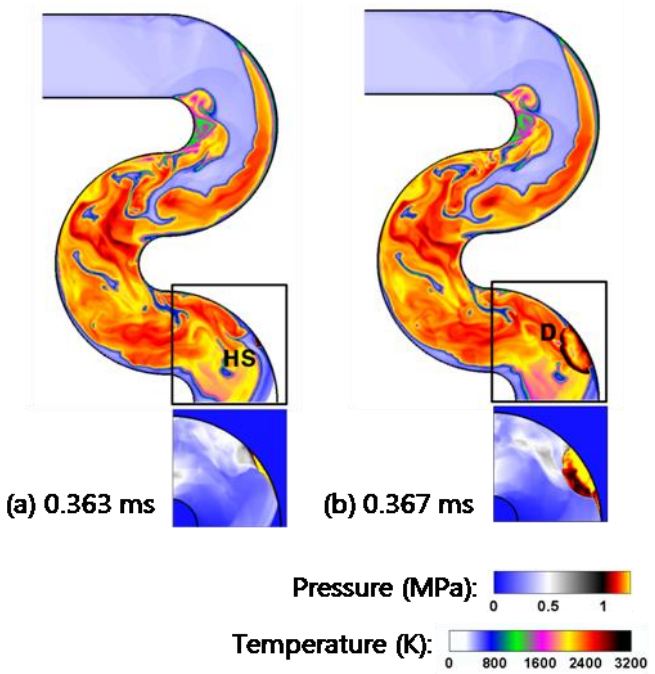
10-9. LASER 점화 및 Feedback control 시스템 개발 (김현우)

10-10. 플라즈마 분광을 통한 달 (우주) 탐사 (최수진)

실험실: 고에너지 응용 연구실 XEL(eXtreme Energy Lab.)
연구실 홈페이지: http://ecl.snu.ac.kr/
교수 연락처: (02) 880-9334, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr
담당조교: 김보훈 (02) 880-1507, E-mail: bhkim@snu.ac.kr

10-1. 탄소성거동을 고려한 연소폭발천이 현상 연구

연소 현상은 크게 정상 화염으로서의 폭연과 비정상 화염으로서의 폭굉으로 나누어 볼 수 있다. 여기서, 폭굉은 초음속 화염으로서 큰 압력과 밀도의 변화를 가지게 되어 구조물 손상 및 인명 피해를 발생시킬 수 있다. 예를 들어 자동차의 노킹의 경우, 엔진 수명 단축 및 효율 감소 현상을 유발하고 연료를 이송하는 관에서의 갑작스런 화재가 폭굉으로 발전할 경우, 이송관 뿐만 아니라 주위 구조물 및 인명에 큰 피해를 줄 수 있다. 일반적으로, 정상적인 화염 전파 조건에서 폭연이 폭굉으로 발전하기는 쉽지 않다. 하지만 연소폭발천이(DDT) 현상을 거치면서 폭굉으로 발전할 수 있기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데 본 연구 또한 DDT 현상에 관련된 기초 및 응용 연구로서 장애물을 포함하는 굽은 관을 사용하여 지형적 변화에 의해 유도되는 반사 충격파와 화염의 상호 작용에 대한 연구를 수행하고 있다. 아래의 그림 1은 굽은 관에서의 폭굉 천이에 의한 압력 상승을 확인할 수 있으며 그림 2에서는 이러한 DDT 현상을 충격파의 강도와 장애물의 크기에 따라 표로 만든 것으로서 장애물이 크고 충격파의 강도가 강할수록 DDT 촉발에 유리함을 확인할 수 있다.



U자 튜브내부에서 충격파가 에틸렌-공기 화염과 반응할 때 온도와 압력 전산해석

담당조교 : 곽민철 (mc4444@snu.ac.kr)

10-2. 연소 모델링 및 고에너지 열유체 전산 해석

An accurate and reliable prediction of reactive flow is a challenging task when characterizing an energetic material subjected to an external shock impact. The present study aims at investigating the size effect behavior of a heavily aluminized RDX by using a detonation rate model that includes ignition and growth mechanisms for shock initiation and subsequent detonation. A series of unconfined rate stick tests and hydrodynamic simulations are conducted to construct the size effect curve which represents the relationship between detonation velocity and radius of the charge.

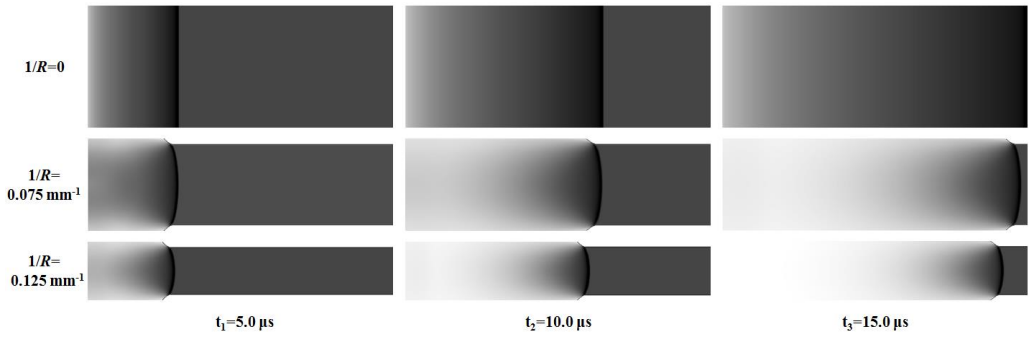


Fig. 1 Density contours for unconfined rate stick simulation of 0 (top), 0.075 mm^{-1} (middle), and 0.125 mm^{-1} (bottom) inverse radius cases with density range 0.1~2.4 g/cc

A pyrotechnic system consisting of donor/acceptor pair separated by a gap relies on shock attenuation characteristics of the gap material and shock sensitivity of the donor and acceptor charges. We apply a level-set based multimaterial hydrocode with reactive flow models for pentolite donor and heavily aluminized RDX as acceptor charge. The complex shock interaction, critical gap thickness, acoustic impedance, and go/no-go characteristics of the pyrotechnic system are quantitatively investigated.

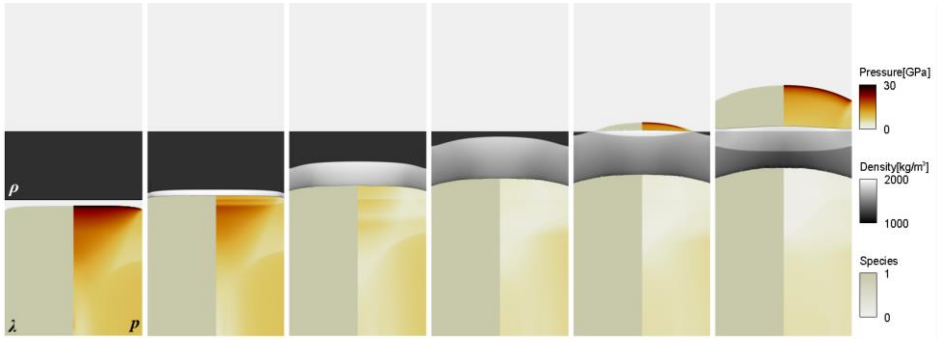


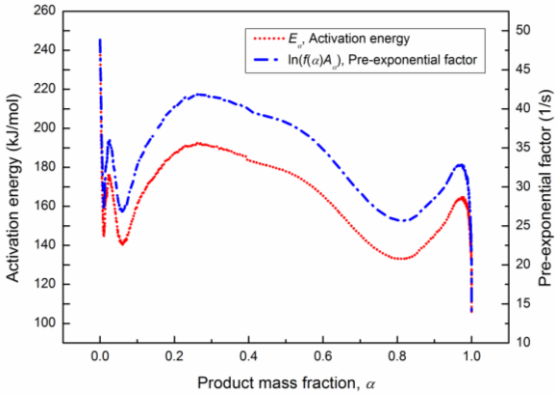
Fig. 2 Shown reaction progress and pressure for donor (bottom)/acceptor (top), density for PMMA (middle). 25 mm Gap at times *t*=7, 8, 10, 12, 13, and 15 μs.

담당조교 : 김보훈 (bhkim@snu.ac.kr)

10-3. DSC 기반 반응속도식 구축 연구 (김유천)

고체 혹은 액체 상의 추진제, 화약 등과 같은 고에너지 물질의 정확한 전산모사를 위해서는 기본적인 Navier-Stokes 지배 방정식에 더하여 정확한 형태의 화학반응 속도식이 구성 방정식으로서 필요하다. 화학반응 속도식은 열적 가열 실험을 기반으로 하여 얻어지게 되는데 시차주사 열량계 (Differential Scanning Calorimetry, 이하 DSC) 는 오랫동안 사용되어 온 대표적인 열량 실험의 하나이다. DSC 실험 데이터를 바탕으로 Friedman 이 제안한 등전환 방법을 적용할 경우 대상 고에너지 물질의 반응속도식을 생성물의 질량분율의 함수로서 반응속도식 변수들을 통해 구축할 수 있다.

전산모사 영역에서 기존에 사용되던 화학반응 모델들은 대게 1-step 또는 전체적인 화학반응에 주요한 영향을 미치는 몇몇 세부 화학반응 단계로 구축된 것들을 사용해 왔다. 반면 DSC와 등전환 방법을 기반으로는 하는 반응속도식의 경우 전체 화학반응 과정을 그림 1과 같이 매 질량분율마다 변화하는 매우 구체적인 속도식 변수로 표현하기 때문에 매우 높은 정확성을 갖으며, 계산 코드상에서는 계산 되는 화학 종 변수가 1개로 유지되기 때문에 1-step 화학반응식의 높은 계산 효율 또한 동시에 획득할 수 있다.



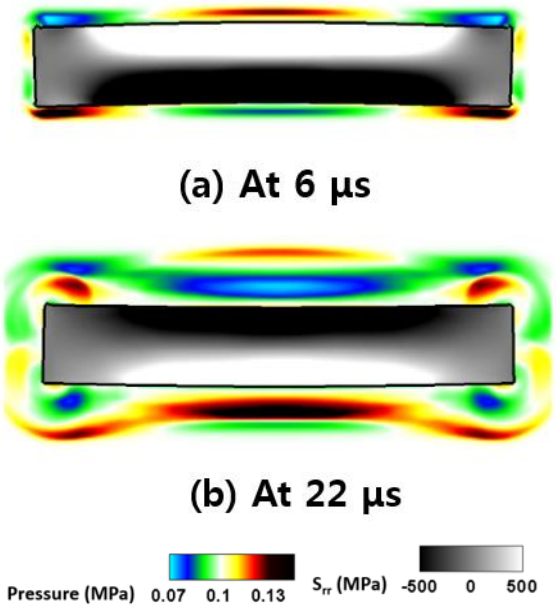
DSC 기반 반응속도식의 반응 속도 변수

DSC 장비

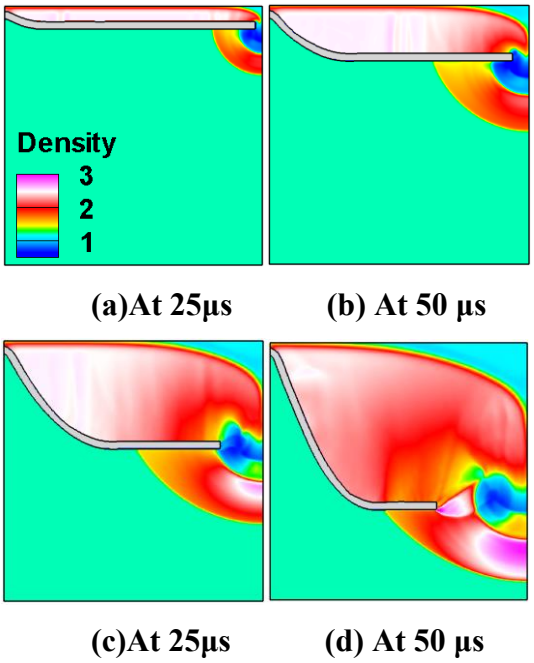
담당조교 : 김유천 (posirius@snu.ac.kr)

10-4. 차세대 우주추진 체계 개발을 위한 FSI 해석

추진기관은 높은 추력을 내기 위하여 2000 K, 100 기압 이상의 고온 고압의 환경에 노출되고 압력섭동이 지속적으로 일어나기 때문에 구조체의 파괴가 쉽게 일어날 수 있다. 따라서 설계 단계에서부터 구조체의 안정성을 실험 및 수치적인 방법으로 평가를 하게 된다. 이를 위해서는 추진기관 내부의 연소현상에 대한 해석도 중요하지만 연소에 의한 압력이 구조체에 전달 되었을 경우, 구조체의 거동 및 파괴를 예측하기 위한 fluid structure interaction(FSI) 기법이 필요하게 된다. FSI 기법은 유체와 고체 사이의 경계면을 추적하고 경계에서 경계값(boundary condition)을 결정해 주어야 유체와 고체의 해석을 수행할 수 있다. 본 연구실에서는 ghost fluid method(GFM)을 사용하여 경계면 추적 및 경계값을 결정한다. 아래의 그림 1 은 FSI 기법을 이용하여 떨리는 판에 의한 주변 유동장의 변화를 나타낸 것이다. 항복응력이 높은 베릴리움 판의 탄성 거동에 의하여 바뀌는 주변 유동장의 변화를 나타내었다. 그림 2 는 로켓 발사대에서 로켓의 화염에 의해 변형되는 하부 지지대의 변화를 해석한 것이다.



베릴리움 판의 탄성거동 시 주변 유동장 압력 변화 및 고체 내부 응력 변화



로켓 발사대 하부 지지대 형상 변화 및 로켓 화염의 밀도(kg/m^3) 분포

담당조교 : 이영헌 (acd1236@snu.ac.kr)

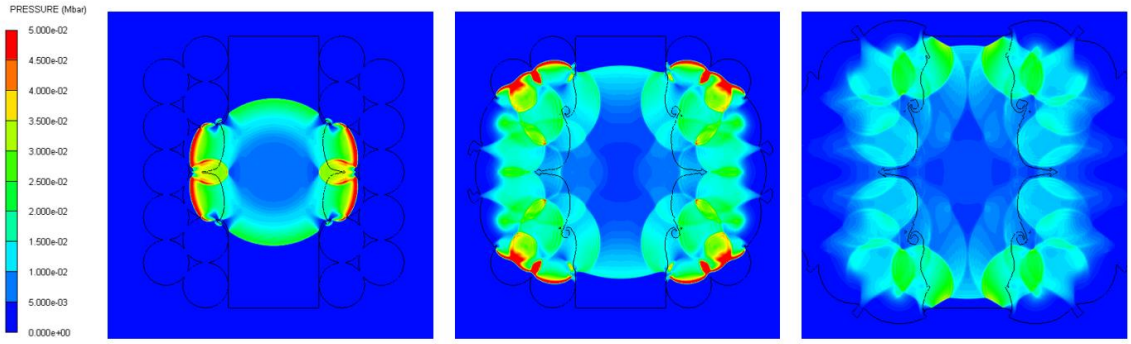
10-5. Fireworks 모델링 및 전산 해석

Fireworks (불꽃놀이) 는 우리 일상 생활에서 주로 대형 행사 및 국제 대회 등에서 한번씩은 꼭 행해지는 과정 중 하나이다. 즉 우리 생활에서 밀접히 관련되어 있지만 폭죽놀이에서 쓰이는 폭죽은 국내에서 쉽게 제조되지 않고 중국 등 해외에서 수입하는 실정이고, 시험 또한 비용 및 운용 등의 문제 때문에 직접 수행하기가 다소 어렵다. 즉, 준비 과정이 다소 복잡하고 어렵다는 단점이 있다.

따라서 각종 행사에 많이 쓰이는 불꽃놀이의 고비용, 저효율의 실제 시험을 대체하기 위한 불꽃제품 시뮬레이터 제작 및 연출용 SW제작이 요구된다. 그런데, 이러한 것들을 개발, 제작하기 위해서는 불꽃놀이에 사용되는 화약의 대한 연소 거동 원천 기술과 전산적, 수치적 연소 모델링 방법론 획득이 필수적이다.

불꽃놀이의 폭죽은 타상연화(Aerial shell)이라고 부르며 내부에는 실제적 불꽃을 나타내는 성(Star)가 가장자리에 채워져 있으며, 중심에는 성의 연소 반응을 유도하는 할화약(Burst charge)가 충전되어 있다. 이 화약들은 주 구성성분이 $KClO_4$ 물질인 일종의 추진제(Propellant)로서 폭굉 반응(Detonation)을 야기하지는 않지만 주변 화약을 충분히 연소시킬 수 있을만한 에너지를 포함하고 있다.

본 연구에서는 타상연화의 일부만을 모델링 하여, 내부 할화약 및 성의 기폭 반응의 대한 전산 해석을 수행하였다. 아래 그림은 시간에 따른 직사각형 형상의 타상연화의 내부 압력 변화(압력장)를 나타내며, 처음에 할화약 중앙에서 점화반응이 일어난 후 5.0 마이크로초인 순간일 때 내부에서 강한 압력파가 전파되어 직사각형 모양을 형성하며 채워진 성을 연소시키는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, 14.5 마이크로초 일 때는 연소가 이미 진행된 star가 외부 공간으로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있다.



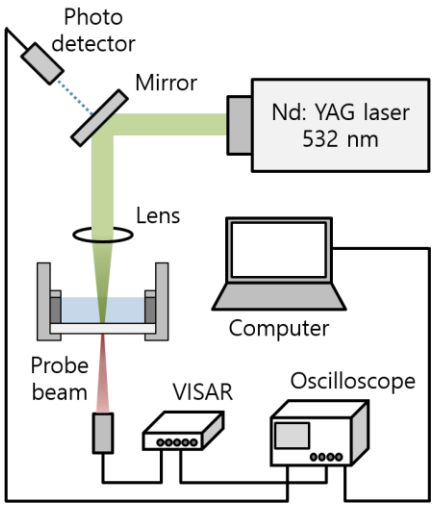
a) 5.0 μs　　b) 10.0 μs　　c) 14.5 μs

직사각형 형상의 할화약 및 주변에 인접한 star의 연소 반응 해석 결과 그림

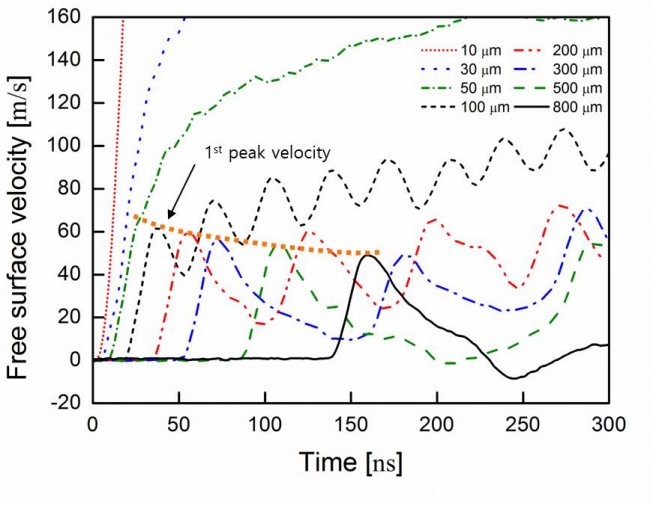
담당조교 : 김민성 (minsungkim14@snu.ac.kr)

10-6. VISAR를 이용한 입자 속도 측정

VISAR는 Velocity Interferometer System for Any Reflector의 약자로 관측하고자 하는 대상의 속도를 측정하기 위한 장비이며 기본 원리는 다음과 같다. Laser beam을 대상 시편에 조사한 후 반사된 빛을 수광한다. 이때 반사된 laser beam은 시편이 움직이는 속도에 의해 Doppler shifted되어 다른 파장의 빛으로 돌아오게 된다. 이러한 파장 차이는 간섭 형태의 변화로 나타나며 이는 photodetector를 통해 1 ns 이하, 10 km/s 이상의 빠른 속도 변화도 매우 정확하게 측정 가능하다. 따라서 본 연구실은 VISAR를 이용하여 1) 2 km/s 이상의 속도로 지구를 선회하며 인공위성 및 우주 발사체에 치명적인 손상을 야기하는 우주먼지의 모사, 2) 대기권 내 미세한 얼음 입자의 지속적인 충돌로 인하여 발생하는 제트 엔진의 블레이드 손상 연구를 위한 마이크로 스케일의 얼음 입자의 고속(~Mach 2) 충돌 실험, 3) 폭약 및 폭탄 등 군사무기의 기폭에 사용되는 pyrotechnic 장비의 소형화를 위한 마이크로 스케일 gap의 shock attenuation 연구를 수행하고 있다. 이와 같이 VISAR를 이용한 연구는 초고속 충돌 및 급격한 상변화에 따른 고온, 고압의 shock physics의 측정 및 분석의 장점을 지닌다.



레이저 기반 충격파 발생 시스템



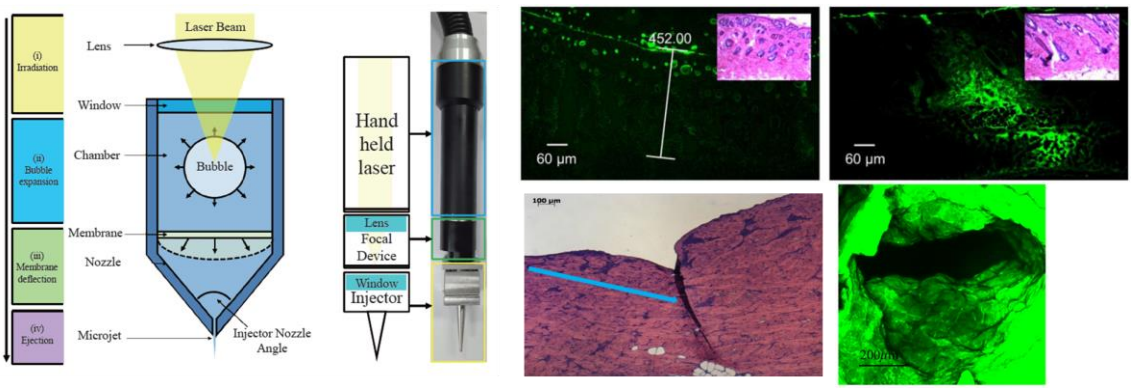
충격파에 의한 Steel Gap 의 자유표면 속도

담당조교 : 유현주 (judeang2@snu.ac.kr)

10-7. 무통증 LASER 주사기 시스템 개발

지난 20세기 중반 이후부터 의학은 레이저의 유용성에 힘입어 많은 진보를 이루었고, 레이저를 이용하여 새로운 시술법을 개발하고자 하는 노력은 계속되고 있다. 레이저 에너지를 새로운 약물 전달 시스템의 에너지원으로 이용하려는 연구도 이러한 노력 중의 하나라고 할 수 있다. 현재 많이 쓰이는 약물 전달 방법에는 주사 바늘과 패치, 섭취 등이 있다. 하지만 주사바늘을 이용한 약물 투여의 경우 통증, 출혈 및 거부감을 유발하고, 패치를 부착하거나 약물을 입으로 섭취하는 경우에는 약물 흡수 시간이 길고, 약물이 표적부위에 도달하는 동안 약물 손실이 많은 단점이 있다. 이와 같은 현 약물 전달 시스템의 단점들을 극복하고자 오래전부터 많은 연구자들이 새로운 약물 전달 시스템을 개발하고자 힘쓰고 있고, 레이저 펄스 에너지를 이용하는 연구도 그 중 하나라고 할 수 있다. 현재 연구하고 있는 바이오리스틱 약물 전달 시스템은 약물 용액을 아주 작은 크기의 젯(jet)의 형태로 만들어 가속시키는 방법을 사용한다. 용액 형태의 약물을 주사바늘의 외경보다 훨씬 작은 지름의 젯으로 만들어 적절한 속도로 가속시켜 인체에 침투시키면 주사 바늘의 단점을 보완할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있을 것이다. 바이오리스틱 과정을 통한 약물 전달은 다른 방법보다 통증을 줄이면서, 전달 과정에서의 약물 손실이 적고 그 효과가 즉시 나타나는 등의 장점이 있다. 우선적인 적용 대상은 피부과 치료에서 마취를 위해 사용하는 리도케인(Lidocaine)으로 바이오리스틱 약물 전달 시스템에 적용하면 그 시술시간과 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

의학/약학대학과의 공동연구를 수행하고, 여러 특허 출원 및 회사로의 기술이전을 목표로 하고 있다.

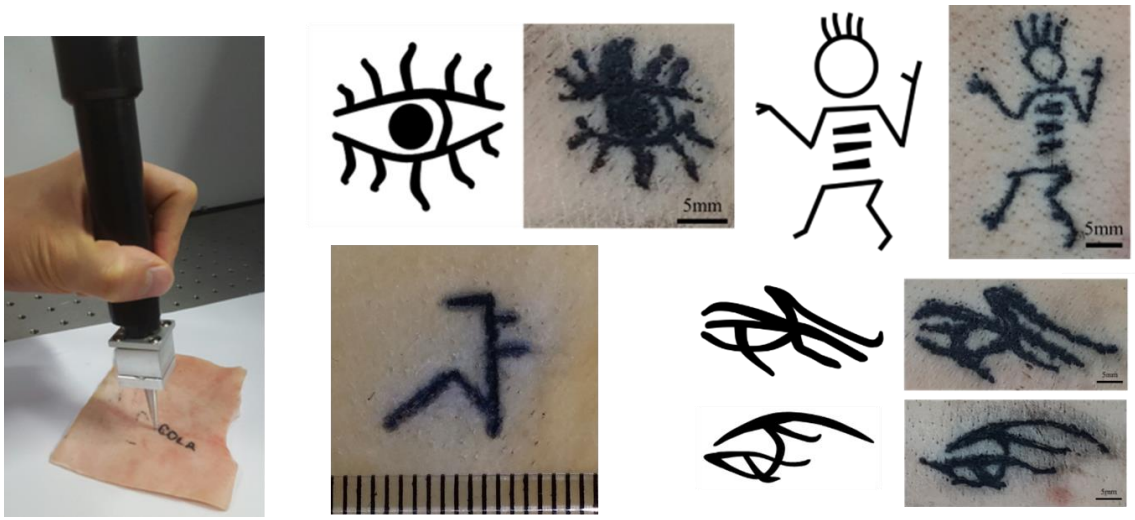


마이크로 젯생성 원리 (왼쪽) 및 피부 침투 이미지 (오른쪽)

담당조교 : 장헌재 (therin21@snu.ac.kr)

10-8. LASER를 이용한 타투 시스템 개발

본 연구에서는 Er:YAG 2940nm 레이저가 물에 대한 높은 흡수계수를 가지는 특성에 착안하여 레이저 빔이 한 면이 탄성막으로 구획된 밀폐된 챔버 안의 물에 집광하여 버블을 발생시키고, 이러한 버블 발생에 의한 물의 급격한 부피 팽창을 탄성막으로 전달시켜 탄성막의 최대 확장을 이끌어 잉크 용액을 마이크로 노즐을 통해 고속으로 가속시켜서 분출한다. 마이크로젯 인젝터 구동부와 피분사 잉크 용액을 탄성막으로 구분함으로써 피분사 잉크에 레이저를 직접 조사하지 않고 잉크 용액을 마이크로젯으로 분사시키게 되어 레이저의 집광으로 인한 잉크 용액의 손상 및 변질의 우려가 없는 새로운 마이크로젯 잉크전달 시스템을 제공한다. 인크젯 프린팅 기술과의 확연한 차별성으로 젯의 강도와 속도의 제어가 매우 용이 하고 젯의 속도가 100 m/s를 넘어 피부조직 침투에 매우 유용하다. 이렇게 가늘고 빠른 젯의 장점은 피부 침투 시 통증을 느낄 수 없으며 되튀김 현상을 최소화 하여 주삿바늘의 오염과 위생과 관련된 단점을 쉽게 극복 할 수 있다. 본 연구는 미래사회가 원하는 피부미용시술(타투)과 메디컬(체내 장기의 극소부위에 약물투여)의 원천기술을 확보하여 국내 뿐만 아니라 세계 미래 미용 및 의료 시장을 선도할 수 있는 신 성장 동력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 기존 전달시스템의 주사형 방식의 통증과 감염의 우려를 불식시킬 수 있으며 일반 경구형 전달 방식의 편리성을 가미한 세계적 수준의 프런티어 연구가 레이저의 창의적 응용으로 가능케 되었다고 생각 된다.



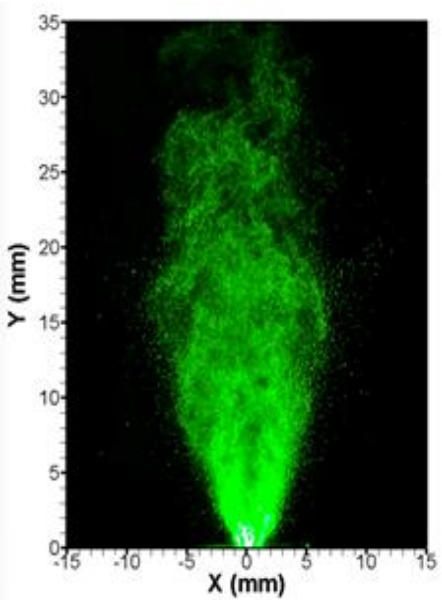
레이저 기반 마이크로젯을 활용한 타투 등을 포함한 피부 미용 시술

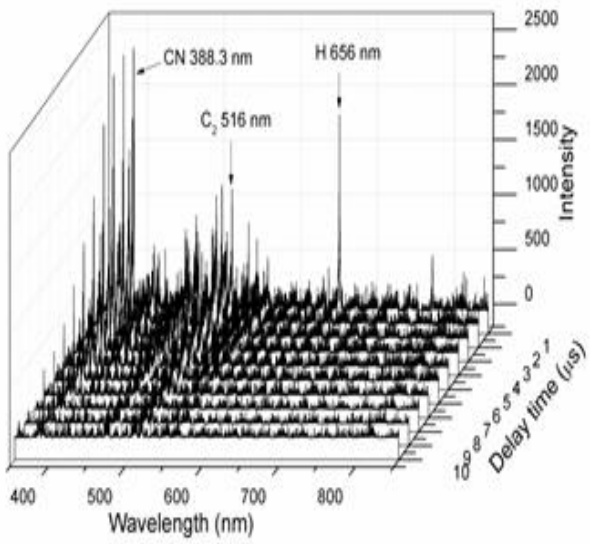
담당조교 : 여성구 (seongguyeo@snu.ac.kr)

10-9. LASER 점화 및 Feedback control 시스템 개발

연료를 직접 주사하는 기반인 스파크 점화 엔진은 열효율과 출력에 강한 장점을 보이지만 노킹(knocking), 역화(backfiring), 조기점화(preignition) 등의 문제들을 극복해야 할 단계에 있다. 이러한 스파크 점화는 자동차 엔진에 주로 쓰이지만 전기 스파크 플러그의 사용과 연관되어 단점들이 존재한다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해 레이저 점화에 대한 연구들이 진행 중이다.

대부분의 기체 상태에서 레이저 점화와 분광 측정은 반응유동에서 이루어진다. 액체가 포함되어 있는 이상상태 유동에서 레이저 유도 분광의 특징은 기체 상태에서와 많은 차이가 있다. 레이저 유도 붕괴와 연료 스프레이 특성의 관계를 이해하는 것은 레이저 점화와 연료 스프레이 농도의 정량측정을 위해 필요하다. 따라서 이번 연구의 주요 목적은 이상상태 탄화수소 연료 스프레이에서 화염 점화 과정을 살펴보고 그와 동시에 스프레이 상태의 연료 농도와 당량비를 측정하는 것이다. 이러한 아이디어는 레이저 점화와 동시에 분광신호를 측정하여 연료 주입을 피드백 조절하는데 쓰일 수 있다. 이렇게 구축한 피드백 시스템은 단일 레이저를 사용한 새로운 계측 전략이 될 수 있다.





담당조교 : 김현우 (khw202@snu.ac.kr)

10-10. 플라즈마 분광을 통한 달 (우주) 탐사

LIBS 성분 분석법은 순간적으로 강력한 레이저 빔이 시료에 집중되어 nanogram 정도의 미세한 부피 내에서 붕괴현상을 야기하여 그 결과 방출되는 플라즈마의 특정한 파장을 가진 빛을 수집하여 구성성분을 분석하는 방법이다. LIBS는 물질 성분의 원거리 검출, 실시간 분석, 시약의 오염 및 손실 방지, 높은 민감도, 고체·액체·기체 및 전도·비전도성 물질에 걸쳐 모든 물질의 정확한 성분분석, 시료 표면의 미세·거대 영역을 분석할 수 있고, 화학조성 분포 조사가 가능한 분석 기법이다. 우주 개발 선진국에서는 이미 우주 탐사 탑재 기술로써 LIBS 성분 분석법이 활발히 연구되고 있다. 본 연구팀은 현재까지 진행해온 선행연구에서 축적된 보유기술 및 기술적 노하우를 바탕으로 우주 원천 기술과의 접목 및 선진 기술을 보유한 Lawrence Berkeley Lab. 과의 공동연구, 그리고 우주 환경 모사를 통하여 LIBS 시스템의 최적화 연구를 진행하고 있다. 레이저 파라미터, 시료의 물리적 특성, 주변 환경 등의 조건이 성분 검출에 미치는 영향을 파악하고 행성 표면의 성분의 정확한 분석을 위해 표준 물질을 활용한 검량선 작성 및 농도의 정량화 데이터 베이스를 구축한다.

교육과학기술부 국가우주지정연구실

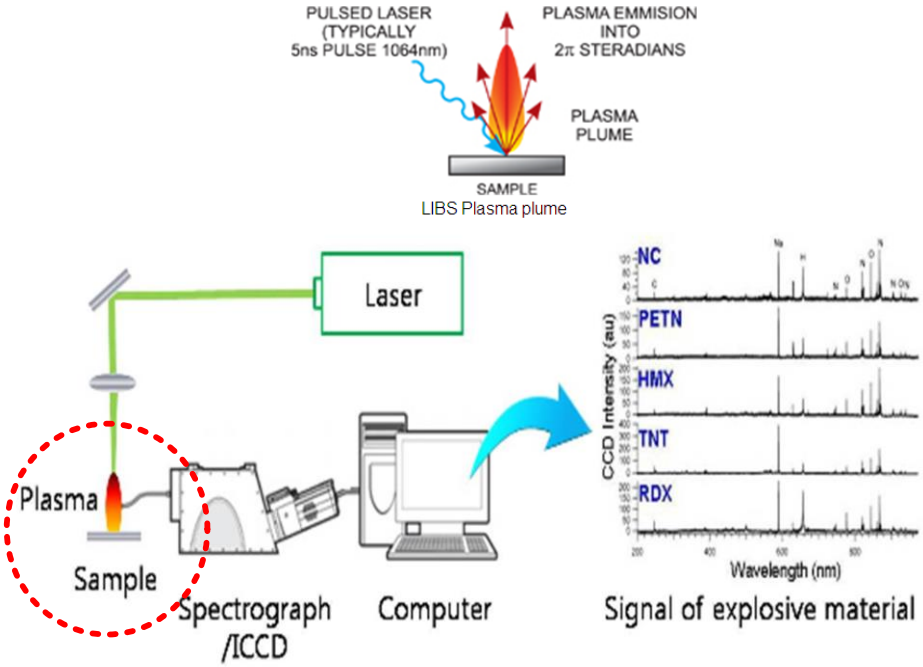


그림 1 LIBS 실험 장비 구성 및 대표적인 고에너지 위험 물질의 스펙트럼

담당조교 : 최수진 (agsky1009@snu.ac.kr)