

## 화학 레이저 (Chemical Laser)

백 승 욱\* · 박 준 성\*\*

화학 레이저(chemical laser)는 레이저빔을 발생시키기 위해서 필요한 여기분자들을 화학반응에 의해 생성하는 레이저를 통칭하여 부른다. 군사적인 목적으로 사용되는 화학 레이저에는 주로 불화수소(HF)레이저, 불화중수소(DF)레이저, chemical oxygen iodine laser (COIL) 등이 있으며, 이들은 모두 메가와트 정도의 매우 큰 출력을 낼 수 있다. 또한, 빠져나가는 유동을 통해 폐열(waste heat)을 방출하므로 매우 우수한 레이저빔을 생성할 수 있다.

HF(또는 DF) 화학 레이저에서는 연소기 내에서 생성된 불소원자(F)가 초음속 노즐을 통해서 레이저 공동(laser cavity)안으로 가속된다. 저온, 저압(5~10torr)상태인 레이저 공동 내에서 불소원자(F)는 수소(H<sub>2</sub>) 또는 중수소(D<sub>2</sub>)와 잘 섞인 뒤, 반응하여 여기된 HF\* 또는 DF\* 분자를 형성한다. 이러한 여기 상태의 분자들은 stimulated emission을 통해서 빛에너지를 방출하게 되는데, 적절한 광학 공명기를 통해 HF 화학 레이저인 경우는 2.7 $\mu$ m, DF 화학 레이저의 경우는 3.8 $\mu$ m의 파장을 갖는 전자기파를 생성한다. HF를 사용한 화학 레이저는 짧은 파장으로 인해 에너지가 더 높은 반면, DF에 의한 레이저빔은 대기 중으로 더 잘 퍼져나간다. 따라서, HF는 space-based laser program에 사용되고, DF는 요격용 고에너지 레이저(tactical high energy laser, THEL)에 주로 사용된다.

Chemical oxygen iodine laser (COIL)에서는 기체 상태의 염소(Cl<sub>2</sub>)와 액체 상태의 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)사이의 화학반응을 이용하여 전기적으로 여기된 기체 상태의 산소분자를 생성한다. 그리고, 여기상태의 산소분자는 분자자체가 지니고

있는 에너지를 요드원자(I)로 전달하며, 이

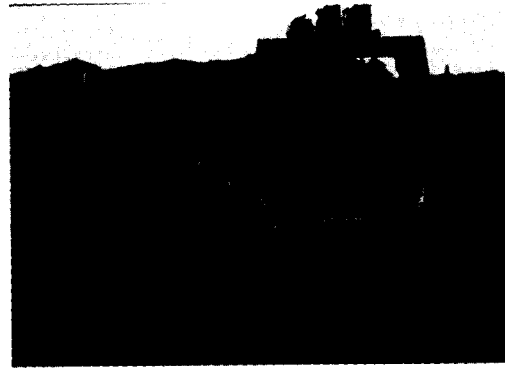


Fig. 1 Tactical high energy laser, THEL

과정에서 1.315 $\mu$ m의 파장을 갖는 레이저빔을 얻을 수 있다. 일반적으로 공중요격레이저(airborne laser)에서는 고출력의 COIL 시스템을 사용한다. 앞에서 언급한 HF 화학 레이저, DF 화학 레이저, COIL 등과 같이 화학반응유동장과 연계하여 생성된 레이저를 일반적으로 유동레이저(flow laser)라고 부르는데, 아래에서는 이러한 유동레이저의 일반적인 개념에 대해 살펴보고자 한다. 1960년대 초 기체 레이저(gas laser)의 발명 이후, 고출력 레이저의 발전과 유체역학에 대한 연구발전 사이에는 깊은 연관 관계를 가지며 각각 기술적·이론적 측면에서 고무적으로 발전되어왔다. 레이저 작동 시에는 항상 불필요한 '열'이라는 부산물을 발생하게 되는데, 이러한 열은 원활한 레이저 작동 프로세스를 방해하게 된다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 초기 레이저 장치에서는 고온 부위를 직접 냉각하는 방법으로 발생하는 폐열을 제거하였지만, 이와 같은 열확산 과정은 레이저 출력을 제한하는 결과를

\* 한국과학기술원, 기계공학과 항공우주공학전공 교수, 한국추진공학회 편집이사

\*\* 한국과학기술원, 기계공학과 항공우주공학전공 박사과정, 한국추진공학회 학생회원

나타내었다. 하지만, 레이저 장치의 발전 과정에서 기체 레이저의 출력은 고체 레이저 장치(solid laser device)에서 볼 수 없는 대류에 의한 폐열 제거가 가능함으로써 그 효율을 획기적으로 증대시킬 수 있었다. 이러한 강제 대류에 의한 폐열 제거 개념은 레이저의 출력을 증대시키며, 유체 역학의 원리를 레이저 기술에 적용한다는 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

유체역학과 레이저 기술 사이에 가장 두드러진 관계는 초음속 비평형 유동을 통해서 분포역전(population inversion)의 구조를 생성하고 이를 조절하는 고출력 유동 레이저(flow laser)에서 나타난다. 이 기체 레이저는 재진입 비행체와 회박 영역 유체역학과 관련된 비평형 유체 역학에 대한 연구에서 비롯된 것이라고 할 수 있으며, 열 에너지의 간섭 복사에너지(coherent radiation)로의 변환작업을 이용한다. 즉, 레이저 발생 과정은 직접적으로 분자 또는 원자계의 내부적인 자유도의 비평형 분포를 생성하는 능력과 관련되어 있다.

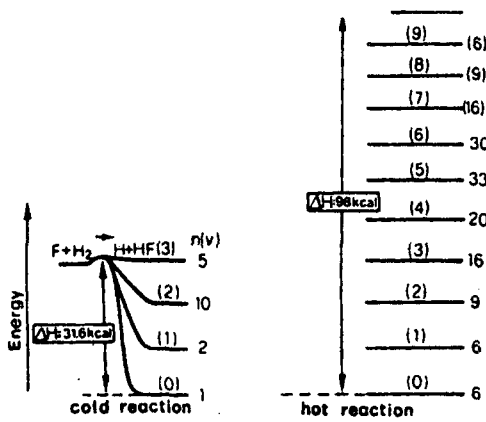


Fig. 2 Pumping of the vibrational levels of the HF molecule by the two reactions  $F+H_2 \rightarrow H+HF^*$  and  $H+F_2 \rightarrow F+HF^*$ . The relative populations  $n(v)$  produced in this way are also shown.

레이저의 이득(gain)을 얻기 위해서는 HF 화학 레이저 시스템의 경우 Fig. 2에 나타나 있는 에너지준위 사이의 특별한 전이에 의한  $(N_u/g_u) >$

$(N_l/g_l)$  관계를 필요로 한다. 앞 식에서  $N$ 은 수밀도를,  $g$ 는 전이 수준의 축퇴(degeneracy)를 각각 나타내며,  $u, l$ 은 각각 상·하위 전이 수준을 표현한다. 따라서, 레이저의 출력을 높이기 위해서는 작동 유체는 열역학적 평형상태에 놓여서는 안 된다. 이러한 특별한 비평형 상태를 생성하고 유지하기 위해서는 작동 유체의 내부 에너지의 복잡한 물리·화학적 재분배가 필요하게 되는데, 이때 초음속 유동은 초음속 확산 레이저의 빠른 팽창을 위해서 필요하며, 이 팽창 현상은 상대적으로 높은 온도 수준을 갖는 진동 에너지 상태와 화학종 성분을 그대로 유지하게 하여, 레이저빔을 생성하는 공동 영역으로 비평형 진동 에너지를 공급해준다. 이와 같은 방법으로 작동하는 레이저 발생장치의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 개략도에 나타나 있는 바와 같이 화학 레이저 발생장치는 기본적으로 고온·고압의 챔버, 노즐 또는 노즐 배열, 레이저 출력을 생산하는 노즐 후류 팽창 영역의 광학 공동, 사용한 기체를 대기 중으로 또는 저장 용기로 보내기 위한 확산 장치로 구성되어 있다.

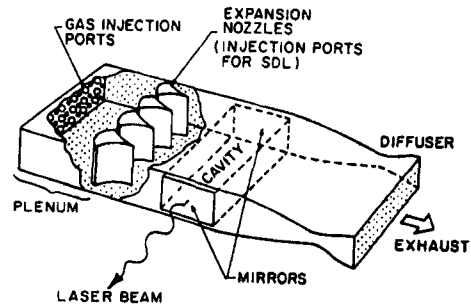
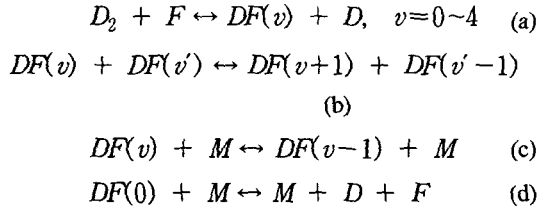


Fig. 3 Idealized open-cycle supersonic-flow laser

화학 레이저 시스템에서 화학 레이저빔을 생성하기 위해서 레이저 공동(cavity) 내에서 고려해야 하는 화학 반응은 불화중수소 화학레이저의 경우, 우선 불소원자와 헬륨 산화제 흐름으로 확산되어 가는 중수소의 혼합 및 반응과정을 가장 중요하게 다루게 된다. 특히, 분포역전(population inversion)과 관련되어있는 기본적인 화학 반응은

다음의 식으로 표현된다.



여기(excited)상태의 불화중수소(DF)는 펌핑 반응(a)에 의해서 생성되며, 양자 준위 점프에 의한 비활성화는 V-V(vibration-vibration) 반응(b)에 의해서 조절된다. 이와 함께 V-T(vibration-transition) 반응은 위의 (c) 화학 반응에 의해서 표현되며, 마지막으로 바닥 상태에서의 해리 반응은 (d)에 의해서 표현된다.

레이저빔은 지향성이 우수하고 광속으로 전파되지만, 대기를 투과할 때 대기의 상태에 따라 전파특성이 달라지게 된다. 따라서, 표적의 종류 및 레이저가 전파되는 공간 특성에 따라 적합한 레이저를 사용하여야 한다. 현재 세계적으로 연구가 진행중인 유도탄 요격용 레이저는 대부분 화학 레이저로서 레이저 발생에 필요한 에너지를 화학반응을 통해 얻게된다. 지상과 공중 및 우주에서의 레이저 전파 특성과 주변 환경 등에 가장 적합한 레이저 종류가 사용되는데, 지상에서는 불화중수소(DF) 화학 레이저, 공중에서는 COIL, 우주에서는 불화수소(HF) 화학 레이저가 적합한 것으로 알려져 있다.

레이저 무기를 구성하는 또 다른 요소는 탐지·추적·조준 발사장치이다. 이들 장치는 레이저를 발사할 표적을 탐지, 추적 및 조준하고 레이저를 발사시키는 역할을 수행한다. 표적의 위치가 계속 변하므로 이를 정확히 탐지, 추적 및 조준하고 레이저를 발사시키는 것은 레이저의 출력과 함께 레이저 무기의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 레이저의 지향성을 고려할 때 기존의 타 무기체계에 비해 매우 높은 조준 및 발사 정확도를 요구할 뿐만 아니라, 레이저 발사에 이용하는 광학계 개발에 여러 분야의 기술이 복합된 매우 높은 수준의 설계·제작기술이 요구된

다.

산업적으로 많은 응용성을 갖고있는 COIL과는 달리 불화수소(HF) 또는 불화중수소(DF)를 이용한 화학 레이저(chemical laser)는 주로 space-based laser program이나 전술 고에너지 레이저 무기(THEL, tactical high energy laser) 등 군사적인 목적에 주로 사용되기 때문에, 선진국들의 정확한 기술수준을 살펴볼 기회가 거의 없는 것이 현실이다. 더구나 이런 레이저를 이용한 요격용 무기들은 선진국들에서 미래무기(future weapon)로 분류하고 현재 연구에 박차를 가하고 있기 때문에, 기술이전은 원천적으로 봉쇄되어 있다. 따라서, 연구수준은 언론을 통해 공개되는 내용들이나 국제적인 저널들을 통해 발표되는 내용들을 통해 짐작할 수밖에 없는 실정이다. 기술적 측면에서 보면 선진국의 경우에 화학 레이저는 무기체계에 활용 가능한 정도의 출력을 달성한 단계이며, 무기체계 응용을 추진 중이고 정확도 및 기동성 등을 향상시키는 연구가 주를 이루는 것으로 알려져 있다. 이 분야의 선진국들은 미국, 러시아, 일본 등을 들 수 있으며, 각각에 대해서 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.



Fig. 4 Concept of THEL(tactical high energy laser)

#### ▷ 미국

이 분야에 대한 연구가 가장 앞서있는 미국은 1970년대부터 시작된 고에너지 레이저 연구를 바탕으로 1983년에 시작됐던 별들의 전쟁(Star Wars), Nautilus계획 등을 거쳐 레이저 무기를 꾸준히 개발해왔다. 특히 2000년에는 이스라엘과

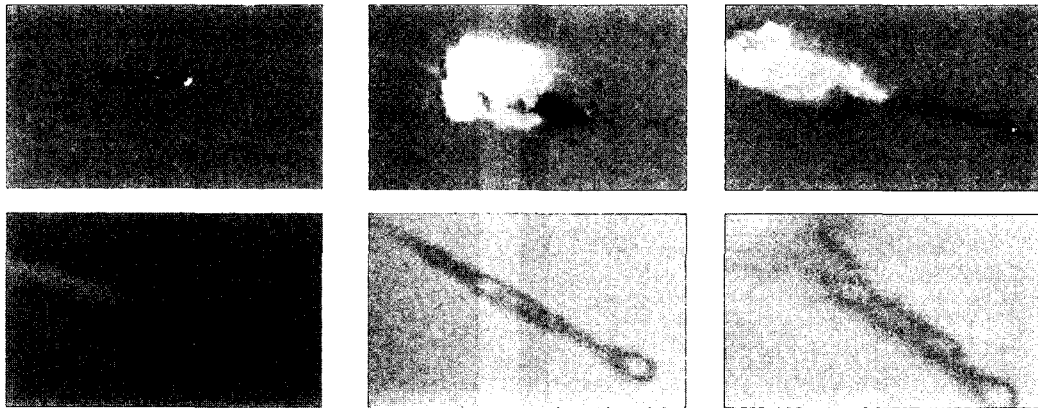


Fig. 5 A THEL/ACTD successfully intercepted and destroyed a Katyusha rocket, armed with a live warhead, in flight at the White Sands Missile Range

공동으로 지상방어를 목적으로 하는 지상배치형 레이저 무기인 전술 고에너지 레이저 무기 (THEL, tactical high energy laser)를 개발하여 비행 중인 소형 로켓을 격추시키는 실험을 성공시켰으며, 정찰 위성의 영상센서 등을 파괴시킬 목적으로 GBL ASAT(ground based laser, anti-satellite)도 개발 중인 것으로 알려져 있다. 미국은 이외에도 탄도탄을 발사단계에서 격추시킬 수 있는 항공기 탑재형 레이저무기(air borne laser)와 우주에 배치하여 탄도탄 및 위성을 요격할 수 있는 우주배치형 레이저(space borne laser)도 개발 중이다. 이외에도 러시아와 중국, 유럽 국가들도 다양한 레이저 무기를 개발하고 있는 것으로 알려져 있다. 레이저 무기의 사정거리는 지상 배치형은 수십 km, 항공기 탑재형 및 우주 배치형은 수백 km에 이르는 것을 알려져 있으나, 사정거리는 레이저의 출력과 표적의 종류에 따라 가변적이다. 특히, 미국은 지상에서 실제 인공위성을 향하여 레이저를 발사시키는 실험을 수행한 적도 있다.

좀 더 자세히 알아보면, 1970년대 초부터 불화중수소화학 레이저에 대한 연구가 착수되어 1980년대 출력 2.2 MW 급 연속발전 불화중수소레이저 (Mid-Infrared Advanced Chemical Laser, MIRACL)가 개발되었으며, 이러한 레이저 기술이 유도탄 및 무유도 로켓 요격용 THEL에 응용되

었다. 그 결과 지난 2000년 8월 28일과 9월 22일에는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 미국의 New Mexico 주의 White Sand 훈련장에서 실시된 요격 시험에서 THEL은 두발의 러시아제 Katyusha rocket을 동시에 추적해 요격하는 데 성공했다. 러시아의 Katyusha rocket은 근접거리에서 발사되기 때문에 순간적인 포착이 매우 어려운 것으로 알려져 있으며, 연속적으로 여러 목표물을 잡아낸 것은 대공방어무기 역사상 처음 있는 일이다. 이 THEL의 놀라운 성능 때문에 미국의 과학잡지인 Popular Science 12월호는 THEL을 올해 최고의 발명품으로 선정하기도 했다.

현재까지의 미국에서 실시된 요격시험에서 THEL은 단 한번도 목표물을 놓치지 않은 것으로 알려져 있으며, THEL은 곧 이스라엘의 북부에 실전배치되는 것으로 알려져 있다. 이곳은 레바논 남부에서 활동하는 이슬람 과격파인 헤즈볼라가 러시아제 Katyusha rocket을 자주 발사하는 곳이다. 현재 미국과 이스라엘군은 공동으로 신속하게 이동할 수 있는 개량형 THEL을 개발하는 데 힘을 쏟고 있다는 것으로 알려져 있다.

#### ▷ 러시아

앞에서 언급한 바와 같이 불화중수소 화학 레이저에 대한 연구는 군사적인 목적에 주로 이용되기 때문에 러시아 및 구소련의 불화중수소 화

학 레이저 연구에 대해서는 거의 알려진 바가 없다. 다만, RSCAC(Russia Scientific Center, Applied Chemistry)에서 화학 레이저에 대한 약 30년 간의 연구 경험이 축적되어 있다는 사실과 화학 레이저의 근본 개념인 고속 냉각에 의한 분자 시스템에서 밀도 반전에 대한 연구가 1962년 러시아의 Basov와 Oraevskii에 의해서 최초로 수행되었다는 점을 감안하면, 그 수준은 미국에 버금갈 것으로 여겨진다. 논문에 발표되는 연구결과들을 살펴보면 러시아의 연구는 특히 이론적인 측면에서 강점을 가지고 있는 것으로 사료된다.

#### ▷ 일본

일본에서는 불화수소(HF)나 불화중수소(DF)를 이용한 화학 레이저보다는 산업적 응용성이 강한 COIL(Cheical Oxygen Iodine Laser)에 대한 연구를 Kawasaki 중공업, Tokai University 등에서 주로 수행하여 왔다. 1992년, 1kW급의 상업적인 COIL이 Niigata 현의 Nagaoka 시에 위치한 Applied Laser Engineering Center에 장치되었는데, 이 장비는 laser cavity가 아음속에서 동작하도록 설계되었다. 하지만, 이런 아음속 COIL은 장비의 크기가 커진다는 단점이 있어, 1994년 초 음속 COIL을 설계하였으며, 10kW를 출력을 얻었다.

현재 국내에서 독자적으로 불화중수소 화학 레이저에 대한 연구를 수행하는 곳은 국방부 산하 국방과학연구소(ADD, Agency for Defence Development) 밖에 없다. 실제로 미국, 이스라엘 등 선진국에서도 불화중수소 화학 레이저에 대한 연구는 군사적인 목적을 가지는 경우가 많기 때문에, 거의 정부 주도로 이루어지고 있다. 국방과학연구소는 대우중공업 등과 함께 고(高)에너지 불화중수소(DF) 화학 레이저에 대한 응용연구를 시작했으며 출력 100W, 10kW짜리 불화중수소 화학 레이저를 개발하고 있다.

그리고, 한국원자력연구소는 과학기술부의 민군겸용기술개발사업의 일환으로 현대중공업(주), 한국전광 및 케이맥 등 국내 산업체와 공동으로

원전시설 내 두꺼운 금속판을 원격으로 절단시킬 수 있는 출력을 가진 6kW급의 화학 레이저 '코일(COIL: Cheical Oxygen Iodine Laser)'을 개발하고 있으며, 최근에 발전에 성공하였다. COIL은 과산화수소수와 가성칼리가 섞인 화학연료를 염소가스와 화학반응시켜 생성된 고에너지 산소를 요오드와 반응시켜 1.3 $\mu$ m 파장의 레이저를 생성한다. 이번에 한국원자력연구소에서 개발된 COIL은 평균출력 2.2kW, 발전시간 4~5분으로 국내에서 개발된 레이저 중 최대 출력으로 출력 면에서는 미국, 일본, 러시아 및 중국에 이어 세계 5위권이며, 특히, 레이저 거울, 순환펌프, 여기산소 발생기 등 주요 부품을 국산화하여 화학 레이저 개발을 위한 국내의 산업적 기반을 확충하였다. 또한, COIL은 광섬유전송방식으로 레이저를 보낼 수 있기 때문에 방사능피폭의 위험이 있는 원자력시설과 같은 산업현장에 유용하게 사용될 수 있다. 출력을 더 높이면 중공업 분야에서 30cm 두께의 철판을 자르거나 원자력시설 해체 때 원격작업을 벌이는 데 쓸 수 있으며, 미사일 방어용 레이저 무기 개발에도 기반기술로 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 한국원자력연구소는 원전시설의 해체에 필요한 출력(15~20kW)을 향후 3년 내에 개발할 계획으로 있다.

화학 레이저에 대한 응용 연구로서 불화중수소 화학 레이저 등과 같은 레이저 무기들은 미국, 러시아, 이스라엘 등 각 국에서 현재 활발히 개발되고 있으며, 주요한 레이저 무기로는 공중 레이저, 우주기지 레이저, 개인 레이저 소총 등이 있다. 공중 레이저는 특수 개조된 보잉 747기까지의 영공에서 화학 레이저를 발사해 적의 미사일을 로켓 추진단계에서 요격하는 것으로, 이르면 2007년께 실전배치 될 수 있다는 점이 가장 큰 장점이 되고 있다. 여기에는 공기 중에서 레이저 강도의 손실이 비교적 적은 COIL을 사용하며, 강도는 수백만 W급이 필요한 것으로 추정된다. 이 정도면 유효 사정거리가 2,000~3,000km 정도이다. 이런 강력한 레이저를 목표물에 쏘기 위해서는 지름 4~20m의 초대형 렌즈나 반사거울이 필요할 것으로 과학자들은 예상하고 있다.

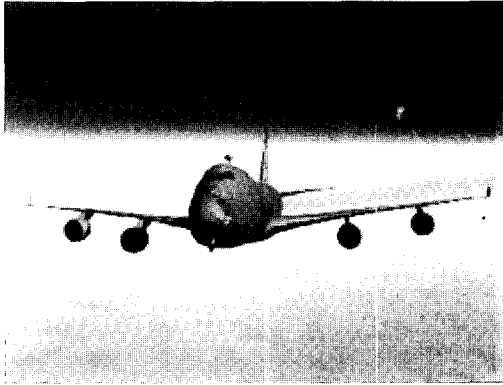


Fig. 6 Airborne laser

값비싼 요격체 대신 레이저빔을 사용함으로써 비용을 절감할 수 있지만, 레이저빔이 대기의 변화에 따라 굴절될 수도 있다는 기술적 한계에 봉착해 있다. 추진단계에서 요격해야 하기 때문에 보잉 747 전단이 적의 영공 주변에서 대기하는 과정에서 공격을 받을 수 있고 비행단계에서의 요격을 위해 지상발사 체제가 병행돼야 하는 단점을 갖고 있다.



Fig. 7 Space-based laser

우주기지 레이저는 현재 미국이 중점적으로 개발에 나서고 있는 무기다. 지상 1천3백여km에 떠 있다가 적의 미사일이 점화 단계에 있을 때 요격한다는 구상으로, 미국은 12~20기의 미사일 요격용 위성을 띄워놓고 한기가 반경 4,000~5,000km의 구역을 담당하도록 할 계획이다. 미국방부는 최근에 BMDO(Ballistic Missile Defense Organization)가 부스터 단계에 있는 적의 탄도 미사일을 파괴시키기 위하여 우주에 고출력 레이저를 배치하는 기술적 타당성을 타진하기 위하여 우주기지 레이저(SBL, Space-Based Laser) 종합 비행 시험(IFX, Integrated Flight Experiment)용으로 1억 2,700만 달러의 초도 계약을 Lockheed Martin-Boeing-TRW사 팀과 체결하였다.

SBL 체계가 2020년 이전에 배치될 가능성은 희박하지만, 최근에 미국이 우주 레이저 무기 개발에 관심을 갖는 이유는 우주에 미사일 방어 기지 건설에 필요한 기술을 개발하고 시험하며, 미래의 우주 위협 출현에 대비하는데 목적이 있다.

화학 레이저는 위에서 언급한 것과 같이 전략 무기형태의 응용으로 현재 많은 부분에서 연구되고 있지만, 화학 레이저빔의 메가와트 급에 이르는 높은 출력과 레이저빔의 금속에 대한 높은 열 흡수율을 고려하였을 때 군사적 목적뿐만 아니라 산업 현장에서 다양하게 사용될 수 있는 미래 기술이라고 할 수 있다. 그리고, 화학 레이저 개발 기술은 열·유체 관련 기술의 통합 시스템 기술로서 자동차, 조선, 항공 등의 중공업과 현재 우리나라에서 반도체 산업으로 대표되는 전자산업 등 다양한 산업분야에서 활용될 수 있으며, 플라스마 생성을 요하는 신 원자력 발전 연구에 사용 및 응용될 수 있다고 기대할 수 있다.