

3 우주개발 · 행성탐사 침범 레이저유도 플라즈마

글_이용일 창원대학교 화학과 교수 yilee@sarim.changwon.ac.kr 이원배 창원대학교 화학과 강사

기 초과학과 응용과학, 그리고 산업의 여러 분야에 이르기까지 극미량 분석화학은 현재 과학기술의 발전에 큰 역할을 했다. 근래 들어서는 그 중요성이 날로 크게 인식되고 있다. 특히 21세기에 들어서면서 국가간의 무한 과학기술경쟁 시대가 도래함에 따라 극미량 분석기술이 국가 경쟁력의 핵심원천으로 등장하고 있으며, 최근 항공·우주, 에너지와 환경, 생체의학 및 멀티미디어 정보·통신분야에 관련되는 새로운 물질의 개발이 가속됨에 따라 신속하고 정확한 분석기술의 뒷받침이 없이는 신기술의 개발자체가 불가능하게 되었다. 또한, 과학과 기술의 경계 모호로 기초원천 연구의 중요성이 점차 증대되고 있으며, 기초과학연구결과가 산업화로 직접 연계되는 Science base innovation의 중요성이 날로 부각되고 있다.

강한 빛의 레이저빔이 고체표면, 액체상, 혹은 기체상에 초점이 맞추어지면 레이저유도플라즈마가 형성된다. 이러한 플라즈마는 주로 고체표면의 조성분석을 위한 에너지원으로 미국, 유럽 등의 세계 여러 나라에서 80년대 후반부터 활발하게 연구되고 있다.

최근 미국의 로스앨러모 국립연구소의 크리머스 박사 연구그룹은 레이저유도플라즈마 기술을 이용하여 50피트가 떨어진 곳에서 토양 및 암석 등을 극미량에 이르기까지 분석할 수 있는 가능성을 발표하여, 앞으로의 우주개발에 있어서 행성탐사에 적합한 기술로 제안되면서 새로운 관심을 받고 있다.

또한, 행성 중의 토양으로부터 원격으로 직접적인 탄소량을 분석할 수 있음을 제안하면서, 생명체의 존

재 유무를 판단할 도구로 가능성을 제안하고 있다.

특히, 로스앨러모 국립연구소의 생태학자인 브리셔스 박사는 “Carbon truly is the currency of life”라고 하면서 레이저유도플라즈마기술이 장차의 우주개발 탐사에 무한한 가능성을 가지고 있음을 시사하였다.

전자온도 8천~9천K인 고온의 들뜸 방출광원

모든 빛은 뜨거운 물질에서 나온다. 여기서 뜨겁다는 것은 물질을 이루는 원자계의 에너지상태가 들떠있는 것을 말하는데, 높은 곳에 있는 물체가 아래로 떨어질 때 소리와 열 등으로 에너지를 방출하듯이 들뜬 상태의 원자계는 안정된 상태로 자발적으로 내려오면서 남는 에너지를 빛의 형태로 방출하게 된다. 모닥불에서 나오는 빛이나 빨강게 달구어진 철판에서 나오는 빛은 열에 의해 들뜬 상태로 된 물질에서 나오는 것이며, 전기를 이용해 열을 가하는 백열전구도 마찬가지로 원리로 빛을 만들어 내는 것이다.

레이저(laser)란 용어는 복사선의 유도 방출에 의한 빛의 증폭(light amplification by stimulated emission of radiation)의 약어이다. 그러나 일반적으로 레이저란 말은 특수한 성질을 띤 빛 자체를 말하거나 레이저 빛을 발생하는 장치를 가리킨다. 우리의 생활 주변에서 가장 친근히 접할 수 있는 레이저 장치는 컴퓨터에 설치되어 있는 시디롬(CD-ROM), 시디레코더(CD-RW)등과 학교 및 기업체 등에서 프리젠테이션시에 쓰이는 레이저 포인터 등이 있을 것이다.

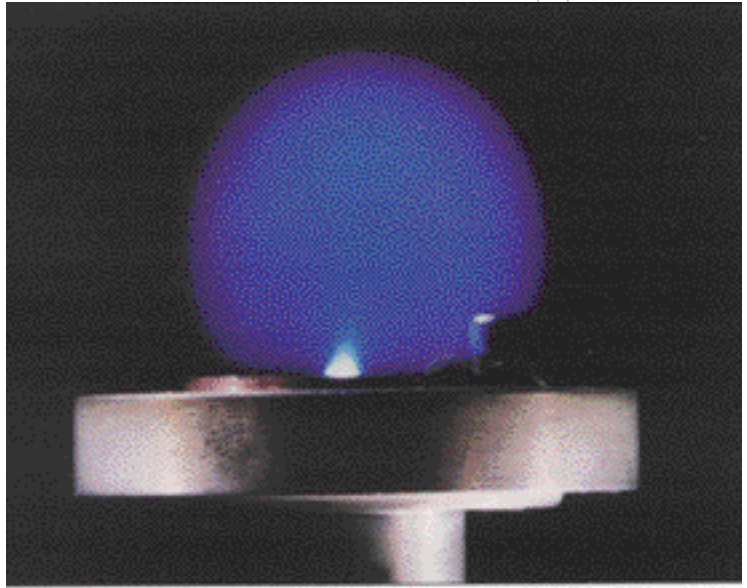
레이저 빛은 어떠한 물체의 원자, 분자를 자극하여 가지고 있는 광 에너지를 빼앗아 마주 보는 거울로 빛을 증폭하여 한쪽 방향으로 일시에 내보내는 것이다.

레이저 빛은 한 가지 파장으로 된 빛으로 단색성(monochromaticity)을 갖는다. 태양빛은 프리즘을 통과할 때 7색으로 분리되지만 레이저는 단색만을 나타낸다. 또 아무리 멀어도 빛의 세기가 거의 줄어들지 않는 지향성(directionality)이 있다.

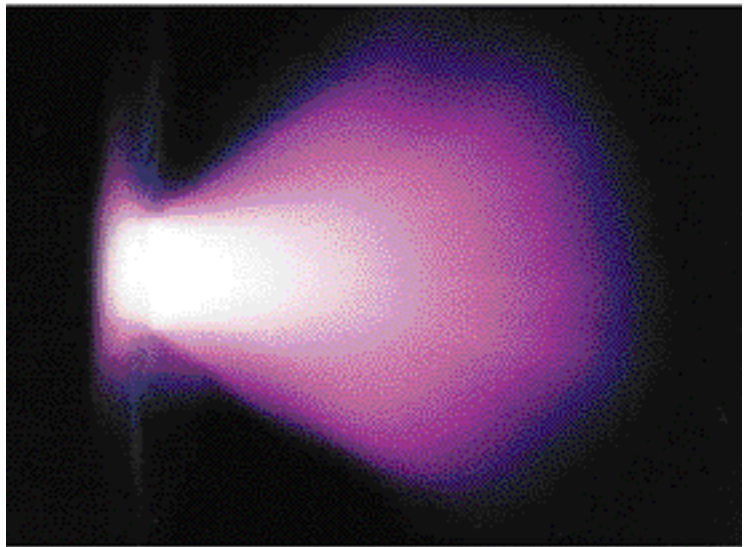
형광등이나 백열등에서 나오는 빛은 앞으로 나가면서 점점 넓어지지만 레이저 빛은 우주간의 거리측정에까지 쓰일 정도로 확산 정도가 작다. 에너지의 집중도도 뛰어나다. 돋보기 등을 이용하여 태양 빛을 모으면 종이나 나무 등을 태울 수 있는 정도지만 레이저빔을 모으면 금속을 자를 뿐 아니라 핵융합까지 가능하다.

레이저는 1958년, 샬로와 타운에 의해 'Maser'란 이름으로 처음 소개된 이래, 과학과 기술에서 레이저의 사용과 발전은 나날이 증가하고 있다. 역사상 최초의 레이저는 1960년 미국 휴즈연구소에서 발명한 고체레이저인 루비레이저. 이어 61년에 벨연구소에서 기체레이저를, 62년에는 MIT, IBM, GE연구소가 동시에 반도체레이저를 발명했다. 1980년대에 이르러 레이저의 이용은 현저하게 증가하였으며, 최근 더욱 신뢰성 있고, 크기가 축소된, 그리고 가격이 저렴한 레이저의 개발은 우리의 생활을 더욱 편하게 만들고 있다.

'플라스마'라고 하는 말의 어원은 그리스어의 $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ 또는 라틴어 'plasma'인데 무엇인가 모양이 만들어졌다"고 하는 의미를 가진다. 과학분야에서 말하는 플라스마는 "대략 같은 수의 양이온과 전자로 이루어진 기체"라고 말하는데, 이 기체는 통상적인 고체, 액체, 기체와는 상당히 다른 성질을 가진 물질의 상태로 존재하기 때문에 주로 '제4상태'라고 불린다. 더 정확히 이야기하면, 플라스마는 고온에서 이온화한 양이온, 그리고 그것과 같은 수의 전자, 임의수의 중성분자 또는 원자로 구성되어 있고, 공간전하가 대



(A)



(B)

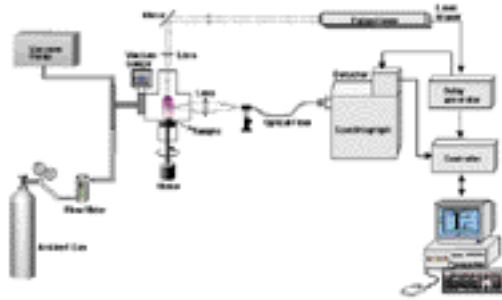
체로 0인 중성의 이온기체인 것이다.

플라스마는 들뜸온도 6천~7천K, 전자온도 8천~9천K인 고온의 들뜸 방출광원이다. 따라서, 플라스마는 그 자신이 광을 방출할 뿐만 아니라 도입된 화학종도 강하게 광을 방출시킨다.

〈그림 1〉에는 엑시머(Excimer) 레이저를 사용하여 구리(A)와 아연(B)표면에서 생성된 레이저유도 플라

〈그림 1〉 엑시머(Excimer) 레이저를 사용하여 구리(A)와 아연(B)표면에서 생성되는 레이저유도 플라즈마의 형상

〈그림 2〉 전형적인 레이저 유도 플라즈마 분광분석법의 기기장치도



스마를 보여 주고 있다.

실시간으로 현장·온라인분석 가능

강한 세기의 레이저빔이 시료의 고체 표면에 초점이 맞추어지면 뜨거운 플라즈마가 고체 표면상에서 형성된다. 이 레이저빔과 고체 물질과의 상호 작용은 플라즈마 물리학자뿐만 아니라 분석화학자에게도 매우 관심있는 분야이다.

실제로 고체 물질을 증발, 해리, 들뜸화, 이온화하는 레이저의 특성은 분석도구로서 많은 가능성을 가지고 있으며, 실제로도 많은 분야에 적용되고 있다. 고체 표면에 레이저빔이 초점화되었을 때, 그 에너지가 고체에 의해 흡수되면 표면의 급속한 부분적 가열(local heating), 증발되어 물질의 붕괴(degradation)가 일어난다. 즉, 빛의 일부가 열에너지로 전환되고, 고체표면에 있는 전자의 에너지 준위를 높여주어서 접촉 충돌이 일어나며 결국 전자는 고체표면으로부터 빠른 속도로 이탈하게 된다.

레이저유도 플라즈마는 매우 고온이기 때문에 여러 영역에서 다른 파장의 스펙트럼을 방사하며, 플라즈마의 형상은 시료물질의 종류와 레이저의 특성, 주위계의 조성 등에 따라 다르게 나타난다. 이러한 광학적 발광은 분광학적으로 분석되어 플라즈마의 원소조성을 알 수 있고, 나아가 시료물질의 원소조성을 알 수 있게 된다. 들뜸화원으로서의 레이저의 유용성은 고

〈표 1〉 레이저 플라즈마 분석법의 장점과 필요성

레이저유도 플라즈마 분석법의 장점	필요성
시료 전처리 과정이 거의 필요없다.	레이저에 의해 시료가 직접적으로 분석되어지기 때문에 기존의 분석법에서 문제시되어온 여러 단계의 전처리 과정을 제거하여 분석 시간을 획기적으로 단축할 수 있다.
전도성과 비전도성 물질 모두에 적용할 수 있다.	고체 시료 분석법인 아크, 스파크 방법은 시료자체가 반드시 전도성이어야 하거나 비전도성의 경우 전도물질을 추가해주어야 하는 불편함이 있었다.
미세 질량이 시료화에 필요하다.	고대 문서나 귀한 골동품 분석의 경우 분석을 위해 산으로 녹일 경우 그 대상은 다시 복원될 수 없었지만, 레이저 플라즈마 분석법은 비파괴 분석법이라 불려질 정도로 아주 적은 시료(약, 0.1 µg~0.1 mg)만이 필요하다.
원거리 분석이 가능하다.	방사능 노출의 위험성이 있는 핵발전소에서의 유지보수와 관련한 분석의 경우와 우주 공간에서의 대기, 흙 분석 등의 경우는 광케이블(fiber optic)을 사용하여 레이저 빛을 전송하고 동시에 플라즈마에서 나온 빛을 수집하여 분석정보로 사용할 수 있다.
실시간으로 현장(in-situ) 분석과 온라인(on-line) 분석이 가능하다.	일반적인 경우, 시료 분석을 위해서는 시료 수집 후 기업체나 연구소 등의 분석실로 가져와야 하는 과정이 요구되었다. 레이저 플라즈마 기술을 이용하여 시료채취하는 현장에서 바로 분석하는 것이 가능하며, 공장에서 나오는 제품의 품질에 관하여, 그리고 소각장에서 나오는 연기의 조성 등을 실시간으로 감시하고 제어할 수 있다.

체, 액체, 기체 등의 시료들을 직접적으로 분석할 수 있는 방법으로 현재 레이저유도 파열분광법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy : LIBS)이라 불려지고 있다. 이러한 레이저유도 플라즈마를 이용한 원자발광법은 현재 사용되고 있는 다양한 원자분광분석법과 비교하여 <표 1>과 같은 여러 가지 장점을 가지고 있다.

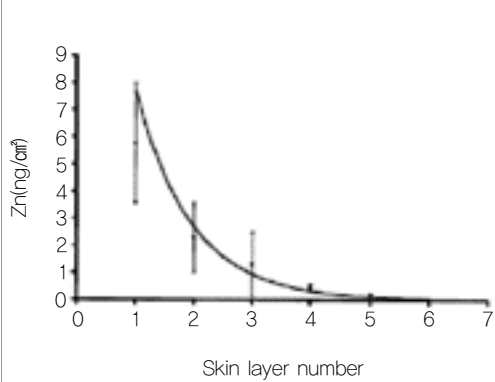
전처리 과정을 거치지 않은 고체, 액체, 기체 시료의 원소 분석을 위한 레이저유도 플라즈마 분석장치에 관한 연구는 최근 많은 관심 속에 진행되고 있으며

대표적인 기기장치는 <그림 2>에 나타난 바와 같이 시료를 증발 혹은 파열(breakdown)시키기 위한 펄스형 레이저빔과 플라즈마 발광의 초점을 맞추기 위한 렌즈, 플라즈마 용기, 검출장치 원소분석을 위한 데이터 처리 시스템으로 이루어져 있다.

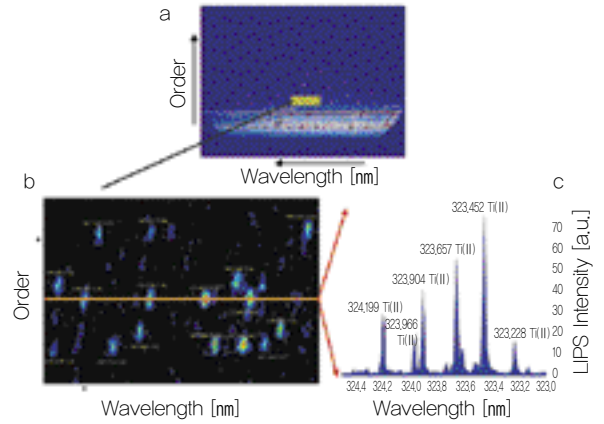
최근 레이저유도 플라즈마 분석은 앞에서 언급한 장점과 가능성을 가지고 금속류, 환경시료, 콜로이드성 및 액체형 시료, 입자, 기체, 박막 등 다양한 분야의 시료에 적용되어 세계 각국에서 극미량 분석법으로 연구되고 있다. 대부분의 연구 결과는 고체시료의

<표 2> 최근 국내외에서 레이저 플라즈마 기술을 이용하여 분석된 시료들

고체	합금 및 철제품 속의 미량원소정량 · 스테인리스 제품 (Zinc-based alloy, Al Alloy, Mineral melt, stainless steel)	기체	화재 억제제(suppressant, CF_3Br , C_3F_7H , CF_4 , $C_2F_6H_2$)의 검출
	광물, 암석 속의 미량원소 정량 (동굴 안의 중유석, Mg, Sr)		산업현장 배출 유해 가스의 배출 상태 실시간 감시 (As, Be, Cd, Cr, Hg, Pb)
	고대 문서 코팅제, 색소(pigment) 및 골동품의 유약(glaze) 성분 분석 (Pb, Ca, CN, Zn, Ba, Hg, Ag)		기체 및 입자의 원소정량분석 및 크기 결정(Ca, Mg, Cr)
	유리 박막류 · 폴리머 및 치아 등의 성분 분석 (xV-TiO ₂ -SiO ₃ , Indium-tin-oxide thin film)		에어러솔 크기의 결정 및 정량분석 (Mg, Ca, Na, F)
	의약품 정제의 코팅두께 · 성분 분석 (Mg, Si, Ti, Ca)		
	사람의 피부(skin)의 깊이에 따른 성분 분석 (Zn)		
	귀금속 정량분석(Au, Ag, Cu)		
액체	용해시킨 유리(melts)의 정성 · 정량분석 (Ti, Sb, Zn, Al, Cd, Cr, Pb)	기타	바닷속 침전물(sediment) 속에 원소분석 (Si, Fe, Mg, Mn, Ca, Ti, etc)
	액체시료 속의 클로로화된 탄화수소 정량 (C ₂ Cl ₄ , CCl ₄ , CHCl ₃)		목재에 쓰이는 보존제(preserver)의 원소 분석 (Al, As, B, Cd, Hg, K, etc)
	강물 및 해수 시료 속의 미량원소 정량 (Al, Ca, Cr, Cu, K, Li, Mg, Mn, etc)		바다 조류 속의 Sr분석
	물속에서 전기분해를 이용하여 흡착시킨 미량원소의 정량분석(Cu, Fe, Pb, Li, B)		흙시료 속의 Ba, Cr, Cu, Sn, Sr 등의 분석 페인트내의 Pb, Ca, CN 등의 원소분석
			파우더(powder) 속의 Sr, Mg, A I 등의 원소 분석
	석탄 속의 C, Si, Ca, Fe, Al, Mg 분석		
	Fe, Ca, Mg에 대한 종이 분석		



〈그림 3〉 피부층의 깊이에 따라 다르게 존재하는 아연의 농도



〈그림 4〉 아크릴로니트릴부타디엔스티렌 (ABS)/폴리아미드(PA) 고분자로부터 측정된 레이저유도 플라즈마의 (a) CCD에 기록된 전체 스펙트럼, (b) 일부분의 이미지 스펙트럼, (c) 1차원적인 일부 스펙트럼

극미량 분석에 관한 것이었지만 최근에는 환경시료, 생물학적 시료, 반도체 등의 시료들로 분석이 행해지고 있으며, 더 나아가 이 분석법의 가장 큰 장점인 온라인 분석(online, real-time)과 현장분석(in-situ)이 많이 이루어지고 있다. 〈표 2〉는 지금까지 진행된 국내외 연구결과에 대하여 시료형태별로 분류하여 정리한 것이다.

국내 연구진, 바다 조류 속 Sr 농도 측정

〈표 2〉에서 언급한 실험결과 이외에도 최근에 급속히 발전하고 있는 과학기술과 더불어 아주 다양한 시도가 이루어지고 있다. 여기서 〈표 2〉에서 언급된 연구 결과 중에, 과연 레이저 플라즈마 기술이 어떤 과정으로 적용되는지 예를 들어보자.

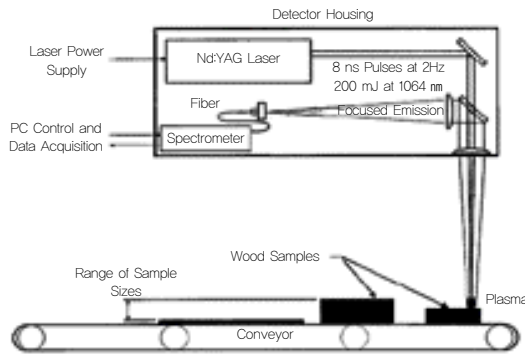
2000년 미국 플로리다 대학 화학과의 선(Sun) 교수는 농도가 다른 ZnCl₂ 용액을 사람의 피부에 노출시킨 후(900ppm의 ZnCl₂를 30분 동안 피부에 접촉시킴), 레이저 플라즈마기술을 이용하여 피부에 포함된 아연(Zn)의 농도를 분석하였다. ZnCl₂용액과 제일 많이 접촉하고 있는 제일 바깥에 있는 피부층이 아연을 더 많이 흡수할 것이고 더 깊이 내려 갈수록 흡수

율은 점점 떨어질 것이다. 각각의 피부시료(피부층, 10~20μm)를 시료대에 올려놓고 Nd:YAG(1,064nm, 60~360mJ) 레이저를 초점 렌즈를 이용하여 집광시켜 플라즈마를 생성시킨 후 플라즈마 내에서 나오는 발광스펙트럼을 분리하여 컴퓨터로 얻어진 데이터를 처리하였다.

〈그림 3〉은 레이저유도 플라즈마를 이용하여 사람의 피부층에 따른 아연 존재량의 정량분석 결과를 보여주고 있다. 또한, 레이저유도 플라즈마를 이용하여 재활용 고분자 물질을 효과적으로 분리하는 방법을 개발하였으며, 이를 이용하여 재활용 고분자의 종류를 고분자 물질에 첨가되는 무기물질의 성분으로부터 분류하는 데 성공하였다.

〈그림 4〉에는 아크릴로니트릴부타디엔스티렌 (ABS)/폴리아미드(PA) 고분자로부터 측정된 레이저유도 플라즈마의 발광스펙트럼을 보여 주고 있다.

최근 레이저 유도 플라즈마를 이용하여 구리, 크롬, 비소(copper chromated arsenate(CCA))처리된 목재 생산품과 처리되지 않은 생산품을 〈그림 5〉에서 보이는 것처럼 컨베이어 벨트 위에서 생산되어 나온 제품을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템을 개발해

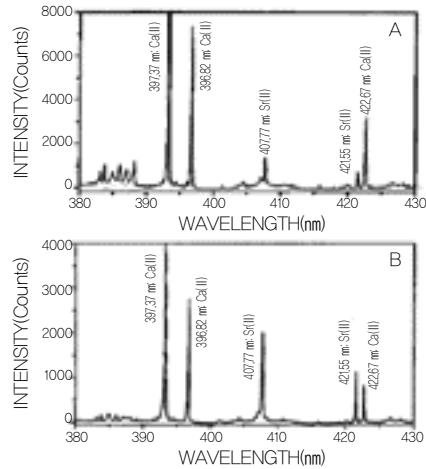


〈그림 5〉 목재에 처리된 크롬을 실시간으로 검출하기 위한 컨베이어실험 장치도

냈다. 이 장치에서 생산되어 나오는 제품들을 92~100%내의 정확도로 크롬의 발광신호를 이용한 레이저 플라즈마 기술을 사용하여 크롬 처리된 것과 그렇지 않은 것을 구별하였다.

국내에서도 레이저 플라즈마 기술을 사용하여 바다 조류(algae) 속에 낮은 농도로 포함되어 있는 Sr의 농도를 직접 분석하는 장치를 개발하여 정확도를 측정하였다. 이 연구를 통하여 Sr를 약 5%의 정밀도내에서 측정할 수 있음이 밝혀졌으며, 〈그림 6〉에 레이저 플라즈마 기술로 적용시켰을 때 얻은 발광신호를 보여 주고 있다.


지금까지 레이저유도 플라즈마를 이용한 극미량 분석의 원리와 응용에 관하여 현재 개발중인 결과를 살펴보았다. 최근 급속도로 발전하는 전자공학 및 광학 기술로 인하여 크기가 작으며 세기가 세고 자외선 영역까지의 빛을 내는 소형의 레이저가 개발되어 레이저유도 플라즈마분광법의 응용에 많은 다양성을 더해 주고 있다. 특히, 최근의 광섬유기술의 발전은 수 GW/cm²까지의 레이저 파워를 전달할 수 있는 광섬유를 개발함에 따라 이를 이용한 원격 레이저유도 파열 분광법의 개발이 전세계적으로 관심의 초점이 되고



〈그림 6〉 바다조류 (Algae) 시료 중의 Sr의 극미량 분석을 위한 레이저유도 플라즈마 발광스펙트럼 : (A) Chlorella, (B) Sargasso sample

있다.

또한, 기존의 분석법으로는 사실상 정확한 분석이 불가능한 행성탐사나 지질탐사 혹은 접근이 용이하지 않은 유해공간에서의 분석에 레이저유도 플라즈마를 이용한 극미량 분석은 세계 각국의 우주 개발과 더불어 급속도로 많은 발전을 하고 있다.

어떤 물질이든 정확히 직접적으로 분석할 수 있는 공인된 분석법은 현재까지 개발되지 않았으나, 레이저유도 플라즈마를 이용한 극미량 분석법은 이러한 목적으로 계속적인 연구가 진행될 것이며, 특히, 현장 분석기거나 분석방법으로 실제 환경시료 및 생체화학 시료, 유해환경의 원격분석, 나아가 식품산업이나 유전공학 산업현장에서의 온라인 분석으로 적용되어, 매우 폭넓게 활용할 수 있기 때문에 앞으로의 연구개발 결과에 따라 파급효과가 상당할 것으로 예상된다. 



글쓴이는 미국 매사추세츠대학교 이학박사, Applied Spectroscopy Reviews 편집장, 현 창원대학교 화학과 교수