

레이저 基礎科學분야에서의 利用과 展望

# 自然光의 限界넘는 特性 活用

張 浚 成

(서울大自然大교수)



레이저의 이용이라면 레이저光의 특징인 단색성(monochromacity), 가간섭성(coherency), 지향성(directivity)이 좋고 빛의 세기밀도(intensity)가 크다는 등의 성질중 적어도 하나 혹은 둘이상의 복합적 성질을 이용하여 그의 특징을 살려야 일반 자연광보다 레이저를 이용하는 가치가 있게 된다.

즉, 일반자연광으로는 얻을 수 없는 성질을 레이저를 이용함으로써 많은 새로운 발전분야를 갖게 되었다.

레이저의 이용을 이용되는 분야별로 살펴보면 레이저의 특징을 더욱 살리기 위한 레이저자체의 연구를 비롯하여 기초과학 연구분야, 산업, 의학, 군사분야 등에 널리 이용되고 있다. 여기

에서는 기초과학 연구분야를 단편적으로 또한 개괄적으로 레이저의 이용과 전망을 살펴 보기로 한다.

### ◇非線形光學

레이저가 나타나자 초기부터 레이저의 이용으로 많은 발전을 한 분야가 비선형광학 분야이다.

일반적으로 물질에 전기장의 세기 E를 가하면 E에 비례하여 광학적 성질을 나타내는분극 P가  $P=XE$ .....〈1〉의 비례관계식이 성립한다. 여기에서 x는 감수율이다. 이와같은 단순한 비례관계는 일반 자연광과 같이 세기가 작아 전기장의 크기가 작은 경우에 일어나지만 레이저와 같이 세기가 커짐에 따라, 즉 전기장의 크기가 커짐에 따라 분극 P는  $P=X_1E + X_2E^2 + X_3E^3 + \dots$ .....〈2〉와 같이  $E^2$ ,  $E^3$ 에 비례하는 항이 포함되는 비선형 효과가 나타난다. 여기에서  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,는 각각 제 1 차, 제 2 차, 제 3 차 감수율이다. 감수율  $X_2$ ,  $X_3$ 는 작기 때문에 E가 적은 일반 자연광에서는 제 2, 3 항은 무시되어 식〈1〉과 같이 비례관계가 성립하지만 E가 큰 레이저 광에서는 제 2, 3 항을 무시할 수 없어 비선형 현상이 나타나게 된다.

E의 크기에 대하여 간단히 살펴보면 자연광 램프에서 1 KW의 램프라면 상당히 큰 출력의 램프로서 1 m떨어진 점에서의 E의 크기는 2.4volt/cm이다. 그러나 고체 레이저에서 첨단 출력 5 MW/cm<sup>2</sup>는 쉽게 얻을 수 있는 출력으로 빛이 퍼짐없이 직선으로 진행하기 때문에 거리에 관계없이 E의 크기는  $4.13 \times 10^8$  volt/cm를 갖는다. 이와같이 E가 대단히 클때에만 비선형효과가 나타나므로 비선형광학 분야는 레이저가 출현함으로써 발전된 분야이다.

식〈2〉의 첫째항인  $X_1$ 의 항은 선형광학 성질을 나타낸다. 즉 굴절률, 흡수, 이득, 부굴절 등의 성질로서 고전광학 분야에 해당한다.

둘째항인  $X_2$ 의 항은 일반적으로 3파혼합(three wave mixing)이라 부를 수 있는 E의 2차 효과항이다. 이에 해당하는 대표적 현상은 제2고조파 발생(Second Harmonic Generation)과 파라메트릭 발진(Parametric Oscillation)이 있다. 제2고조파 발생은  $\omega$ ,  $\omega$ 의 광파가 입사하여  $2\omega$ 가 발생하는 과정으로, 예로서 Nd-YAG 레이저의  $1.06\mu$ 의 광파가  $0.53\mu$ 의 광파(파장으로 1/2)로, 발생하는 과정이다. 파라메트릭 발진은  $\omega_1$ ,  $\pm\omega_2$ 의 광파가 입사하여  $\omega_1 \pm \omega_2$ 의 광파가 발생하는 과정으로 비선형 결정내에서 외부조건(온도, 결정방향)을 변화 시킴으로써 레이저광의 파장을 어떤 영역에서 연속적으로 변화시킬 수 있는 한 방법이다.

세째항인  $X_3$ 의 항은 일반적으로 4파혼합(four-wave mixing)이라 부를 수 있는 E의 3차 효과항이다. 제3고조파 발생(Third Harmonic Generation)은  $\omega$ ,  $\omega$ ,  $\omega$ 의 광파가 입사하여  $3\omega$ 의 광파가 발생하는 과정으로, 즉 Nd-YAG 레이저의  $1.06\mu$ 의 광파가  $0.35\mu$ 의 광파(파장으로 1/3)로 발생하는 과정으로 3차 효과의 한 예이다. 또한  $\omega_1$ ,  $\pm\omega_2$ ,  $\pm\omega_3$ 의 광파가 입사하여  $\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ 의 광파가 발생하는 비축퇴 4파혼합 및 축퇴 4파혼합, 유도 Raman 산란, 유도 Brillouin 산란, dcKerr효과, 2광자흡수, dc 유도조화파 발생등이 가능하여 많은 연구가 진행되고 있다.

또한 4파혼합 과정에서 최근 많은 발전을 하고 있는 위상공액파 현상에 관하여는 새 질에서 살펴보기로 한다.

### ◇ 위상공액파

비선형광학의 한 분야에서 광파의 위상을 반전시킨다, 즉 위상공액파(Phase Conjugated Wave)를 발생시키는 방법이 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 위상공액파는 입사한 파면을 입사한 방향의 반대방향으로 다시 진행시키는 파로서 시간을 반전시킨 결과와 같으므로 시간

반전파라고도 한다. 즉 보통거울에 의한 반사는 사람이 앞으로 진행하다가 거울에 의하여 뒤로 돌아가는 형태의 파면이지만 위상공액파 발생거울에 의한 반사는 앞으로 진행한 사람을 다시 뒷걸음으로 후진시키는 역할을 한다.

수학적으로 복소공액을 구하는 것은 단지 편의적으로 실수부를 얻기 위한 수학적 방법에 지나지 않았으나 물리학적으로 광파의 위상변화를 반전시킨 광파를 발생시키는 방법이 연구되었다는 것은 단지 수학적 표현에 지나지 않았던 공액복소항을 물리적으로 실현시켰다는 것에 큰 의의가 있다.

위상공액파 발생의 개념적 설명은 2광파에 의한 순간적 간섭무늬가 매질의 비선형 굴절률을 이용하여 회절격자를 형성할 때 다른 한 광파가 회절하는 과정, 즉 홀로그래픽 방법으로 설명할 수 있다.

현재 위상공액파를 발생시키는 방법으로는 유도 Brillouin 후방산란, 유도 Raman 후방산란, 3파혼합 및 축퇴 4파혼합 등의 방법이 연구되고 있다.

위상공액파의 활용은 아직 널리 이용되고 있지는 않지만 광학상의 찌그러짐을 일으키는 매질(평평하지 못한 유리, 대기 광섬유 등)에 의한 광학상의 찌그러짐을 회복시키는데 이용할 수 있다. 한 예로서 광섬유를 통하여 광학상을 전송할때 광섬유의 부분적 굴절률의 차이로 광학상에 찌그러짐이 나타난다. 이 때 찌그러진 광학상을 위상공액파 발생기를 통하여, 전송되어 온 광섬유와 같은 광섬유에 다시 진행시키면 광학상의 찌그러짐을 회복시킬 수 있다. 또한 반사율이 1이 넘는 반사체로의 이용으로 핵융합을 위한 레이저의 이용에 있어 중수소 등이 밀폐된 작은 구에 레이저광을 효율 좋게 쬐여야 한다. 일반적으로는 광학계를 미세조정하여 대출력 레이저빔을 집중하여 쬐이지만, 위상공액반사경을 사용하면 자동적으로 효율 좋게 쬐이는 것이 가능해진다. 즉 먼저 직경이 조금 큰 소출력의 레이저로 pellet을 쬐이면 pellet으로 부터의 산란광이 렌즈계에 의해 모



여 대출력 증폭기에 보내져 증폭하고 이 출력을 공액반사경으로 공액파로 반사시켜 역과정으로 돌려 보내면 자동적으로 대출력 레이저빔이 알맞게 쏘여지게 된다. 이 과정에서 강조되는 점은 pellet에서 출발한 광파와 똑 같은 모양의 광파가 도달한다는 점과 공액반사경에서의 반사율이 1보다 클 수 있다는 점이다. 이 2가지의 효과는 레이저 발진공진기에도 응용이 되어 이득이 적은 레이저 매질에 관계없이 레이저 발진이 잘 일어나는 결과를 준다. 공액반사경의 지금까지 보고된 반사율은 600%에 달하고 있다. 위상공액파에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있으며 앞으로 발전 전망이 큰 분야중의 하나이다.

### ◇ 레이저 분광학

복사(빛)와 물질과의 상호작용을 이용하여 물질에 관한 정보를 얻는 분광학은 물질과 공명적 혹은 비공명적인 상호작용을 나타내는 빛의 진동수, 방출, 흡수, 형광, 산란의 강도, 스

펙트럼선의 폭이나 형태, 지향성, 산란의 각도, 의존성등을 통하여 얻어지므로 분광학의 감도나 정밀도는 광원의 성질과 검출계의 성능에 달려 있다. 레이저의 출현 이후 종래의 수은등과 같은 자연광과는 달리 질적으로 완전히 틀리는 광원이 얻어 짐으로써 분광학이 비약적으로 발전하게 되었다.

레이저 분광학의 특징은 레이저광의 단색성이 좋기 때문에 여기선에 대단히 가까운신평광스펙트럼까지 측정이 가능하고, 분해능이 대단히 높은 측정이 가능하고, 편광성이 좋으며, 집속성이 좋기 때문에 미량의 시료에 대하여도 측정이 가능하며, 레이저의 발진선이 풍부하여 측정하는 물질에 따라 적당한 파장을 선택할수 있는 점등의 장점을 가지고 있다. 대표적 예로서 Raman효과를 관측하므로써 분자 및 결정격자의 진동, 분자의 회전, 원자내의 전자전이, 자장중에서의 자유전자의 천이, 스핀파, 플라즈마파, 음파등의 해석을 통하여 분자 및 결정의 구조, 화학반응, 정성분석, 정량분석 등을 정밀도 높게 연구할수 있는 것이 레이저의 특성을 살린 결과이다. 이상은 레이저를 단순히 광원으로 사용하는 경우이었으나 레이저 발진 자체, 혹은 발진에 따르는 여러가지 현상을 연구하는 레이저 분광학도 있다.

레이저의 특성을 이용하는 특수한 분광법으로는 가간섭과도분광법, pico초분광법, 비선형 Raman분광법, 분자선 분광법, 편광분광법 등이 연구되고 있다.

### ◇ 광정보처리

레이저광이 갖는 특징을 이용하여 전기적 방법으로는 불가능한 막대한 정보량을 순수한 광학적 방법으로 짧은 시간에 처리할수 있게 될 가능성이 있다. 이러한 가능성은 홀로그래피로부터 시작된다. 홀로그래피는 렌즈를 사용하지 않고도 상을 기록 및 재생할 수 있는 방법으로 파면을 재생함으로써 3차원 입체상을 얻을 수



있으며, 정보저장밀도가 크며, 기록체의 흠이나 먼지등으로 인한 정보의 손실을 막아주는 농장도(rebundancy;여러개의 대상들이 상호관계가 있어 한 대상이 없더라도 다른 대상으로 부터 추출할 수 있는 성질)가 있으며 재생기구가 간단하면서도 정보처리시간이 짧으며, 한 기록재료에 많은 정보를 중첩하여 다중기록이 가능하며, digital 혹은 analogue정보도 기록할 수 있으며 정보의 공간주파수 결핍, 더하기, 빼기 등의 정보변환성을 자체가 가지고 있다는 점등의 홀로그래피만이 가질 수 있는 고유특성이 있다.

이러한 특성을 살리면서 정보를 기록하는 방법으로는 여러가지 방법이 있으나 고밀도 정보 기록만을 예로 든다면 Fourier변환법, defocusing법, sampling법, random phase sampling 법은 많은 연구가 진행되고 있지만 각각에 장 단점이 있기 때문에 어느 한 방법도 만족스러운 방법은 되지 못하며 앞으로 기록방법에 많은 연구가 진행되어야 할 위치에 있다.

또한 고밀도 정보의 기록저장을 위한 기록재료에 대한 연구로서 정보의 기록과 소거가 가능한 가역형 기록재료로서 Thermoplastic film,

Dichromated gelatin, Magneto-optic film, Photochromic material, Ferroelectric crystal등에 대한 광기록 특성연구들이 진행되고 있다.

이러한 기록재료에 정보의 입출력을 조절하는 조작계와 광학계만 형성하면 광컴퓨터가 형성된다. 광컴퓨터의 한 예로서 2차원 정보를 Fourier변환 하고저 하면 시준된 광을 2차원 정보를 통한 다음, 렌즈를 통하여 촛점면에서 수광하면 이것이 바로 Fourier변환값이 된다. 즉 이 과정은 2차원정보로부터 촛점면까지의 거리를 빛이 통과하는 시간인  $\sim 10^{-9}$ 초에 이루어 진다. 또한 렌즈의 Fourier변환 능력을 응용하면 convolution, correlation의 연산을 짧은 시간에 처리할 수 있다. 이와같은 짧은 시간은 연산처리의 극한값으로 여겨지는 값이다.

이와같이 광기록 방법은 대용량이면서 고속화가 가능하므로 앞으로 컴퓨터로의 발전을 기대하여 볼만한 분야이다.

### ◇레이저의 이용전망은 밝다.

레이저의 과학연구분야에의 이용을 간단히 살펴해보았으나 이 이외에도 간섭성을 이용한 정밀한 계측 연구, 천문학 지구과학에서의 거리 측정의 이용, 레이저에 의한 플라즈마 발생 및 밀도측정연구, 광통신을 위한 전기광학효과 및 광변조 연구, pico초 펄스에 의한 초고속 현상 연구로 고체물리학, 화학반응, 생물학등에의 이용등 널리 이용되고 있다.

레이저광도 이제는 방송 전자파와 마찬가지로 증폭, 진동수 변환, 위상조정등이 가능하여졌으므로 이용도가 대단히 넓어졌으며, 앞으로 출력을 보다 증가시키고, 단파장의 발전, 펄스 폭을 보다 짧게, 단색성을 더욱 좋게, 파장 및 출력을 안정화 시키므로써 레이저의 이용은 더욱 넓어질 전망이다. 마지막으로 레이저의 응용범위는 이미 한 사람이 설명하기에는 너무나 벅찬 감이 있음을 첨언한다.