

레이저 응용을 위한 광학 기초

오늘날 레이저는 광통신망을 통한 인터넷 전송과 같은 통신분야, 반도체에서의 포토리소그라피와 같은 제조 및 가공분야, 분광분석 및 원자력간 현미경과 같은 계측분야 등 다양한 영역에서 산업 및 과학기술 발전을 위해 필수불가결한 도구가 되었으며, 레이저의 응용은 앞으로 첨단기술 분야를 중심으로 지속적으로 확대되어 갈 것으로 기대된다. 이와 같이 첨단기술의 핵심요소인 레이저 및 이의 응용에 필요한 기초광학에 대한 이해는 관련 기술의 발전과 폭 넓은 응용기술 개발을 위해 필수적인 것으로 사료된다.

편집자 주



정 성 호 교수

광주과학기술원 기전공학과

우리 주변의 실생활 및 산업계에 막대한 영향을 미치고 있는 레이저는 형태, 크기, 기능 등에 따라 다양하게 분류할 수 있으며, 많은 경우 우리가 레이저 자체를 거의 의식하지 못하는 상태에서 활용되고 있다. 예를 들면 레이저프린터의 경우 레이저는 프린터 내부에 밀봉되어 외부로 레이저 빛이 드러나지 않게 만들어져 있으며, 오늘날 전 세계 통신망을 연결하는 인터넷의 경우에도 광섬유를 통해 레이저 빛이 집 앞까지 전송됨으로 인해 가능하다. 또한 휴대폰이나 컴퓨터와 같은 초정밀 반도체부품의 제조에서는 파장이 짧은 자외선 영역의 빛을 내는 엑시머 레이저가 있음으로 인해 머리카락의 1,000분의 1보다도 작은 반도체회로 제조가 가능하다.

실제 산업체 및 연구에 응용되는 레이저는 구조 및 형태가 다양하지만 기본적으로 모든 레이저는 그림 1과 같은 구조로 설명할 수 있다.

먼저 레이저 빛을 생성하기 위해서는 외부의 입력에너지(주로 전기에너지를 받아 빛을 생성하는 재료인 레이저매질이 필요하다. 대표

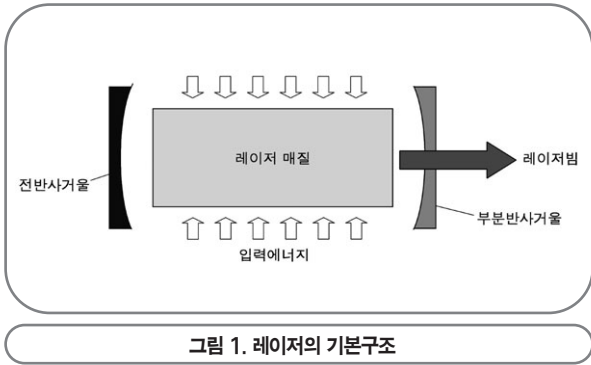


그림 1. 레이저의 기본구조

적인 레이저매질로는 이산화탄소(CO₂), 헬륨-네온, Nd-YAG 크리스탈 등과 같은 기체 및 고체가 있으며 색소레이저와 같이 액체를 매질로 쓰는 경우도 있다. 레이저 매질에 전기나 광학적인 방법으로 에너지를 가해주면 매질은 여기 상태를 거쳐 빛을 내게 되는데 이 빛을 실제 사용 가능한 레이저 빔으로 만들어주기 위해서는 그림1에서와 같이 두개의 거울을 레이저 매질의 양쪽 끝에 설치하게 되며 이를 광공진기(optical resonator)라고 한다. 광공진기의 한쪽 거울은 표면에서 전반사가 일어나도록 처리되어 있으며 다른 한쪽은 약 10~20%는 투과시키고 나머지는 반사하도록 부분반사처리가 되어 있는데, 이 부분반사 거울을 통해 투과되어 나오는 빛을 실제 가공이나 계측에 이용한다.

레이저는 레이저매질에 따라 이산화탄소레이저, 헬륨-네온레이저, 야그(Nd-YAG)레이저 등으로 분류할 수 있으며 매질이 달라지면 레이저에서 나오는 빛의 파장이 달라진다. 이산화탄소레이저의 경우 적외선 영역의 빛(파장 10.6 μ m)을 내며, 헬륨-네온 레이저는 가시광 영역의 빛(0.632 μ m)을, 반도체공정에 널리 사용되는 엑시머 레이저는 자외선 영역의 빛(0.193~0.308 μ m)을 낸다. 반도체 재료를 매질로 사용하는 반도체레이저는 컴퓨터칩 제조와 동일한 반도체 공정을 이용해 제조되며 적외선 영역(약 1.5 μ m 부근)의 빛을 내는데 광통신, CD 및 DVD 플레이어, 바코드 인식기, 계측 및 가공분야 등에 널리 이용되며 전 세계 레이저시장에서 가장 높은 매출액을 점유하고 있다. 반도체레이저나 헬륨-네온레이저와 같은 레이저들은 일반적으로 수십 밀리와트(mW) 이하의 낮은 출력을 내는 반면 빔의 에너지 분포가 고르고 안정적이어서 계측이나 통신 등에 많이 활용되고 있고, 이산화탄소레이저나 야그 레이저, 엑시머레이저 등은 출력이 높으므로 가공분야에 널리 응용되고 있다.

특히, 레이저 미세가공은 마이크로미터 크기 혹은 그 이하의 정밀도로 가공이 가능하다는 것과 세라믹, 유리, 스테인레스강 등과 같이 기계적 가공이 곤란한 재료도 비교적 쉽게 가공할 수 있다는 잇점으로 인해 초정밀을 요하는 반도체, 전자, 광통신, 의료분야 등에서 널리 활용되고 있다. 레이저 미세가공이 가능한 배경에는 레이저 빛을 광학부품을 사용하여 수 마이크로미터에서 수백 마이크로미터 크기로 집속할 수 있다는 특성이 존재한다. 기계적 방법으로는 가공부를 수백 마이크로미터 혹은 그 이하의 크기로 유지하기가 매우 힘든 데 비하여 레이저의 경우 적절한 렌즈의 선택을 통해 초점크기를 손쉽게 수십 마이크로미터 이하로 만들 수가 있으므로 매우 정밀한 홈이나 구멍을 상대적으로 용이하게 가공할 수 있다. 예를 들면 단순렌즈(single) 하나만 사용하여 초점위치에서 직경 수십마이크로미터 이내로 레이저빔의 집속이 가능하다. 이때 주의해야 할 점은 단순렌즈의 경우 수차(aberration) 보정이 되지 않았으므로 렌즈선택 및 사용방법에 따라 수차의 크기가 달라진다. 예를 들어 구면수차와 코마(coma)의 경우 그림 2와 같이 plano-convex 렌즈의 볼록면이 레이저빔을 향하도록 설치하는 것이 수차를 가장 작게할 수 있는 방법이다. 보다 정밀한 가공을 위해서는 수차보정이 된 렌즈를 사용할 수 있는데 아크로맷 이중렌즈(achromatic doublet)의 경우 구면수차와 색수차를 보정하였으며 초점크기를 약 10 마이크로미터 이내까지 줄이는 것이 가능하다. 다중렌즈를 사용하면 수차를 완전히 제거하는 것이 가능한데 현미경에 사용되는 대물렌즈의 경우 여러 개의 렌즈 조합을 통해 수차가 없도록 설계되었으며 초점의 최소 크기는 빛의 회절현상에 의해서만 결정된다. 이와 같이 수차보정이 완벽히 이루어진 광학계를 회절한계광학계(diffraction-limited optics)라고 하는데 회절한계광학계를 사용할 경우 이론적으로는 초점크기(d)를 레이저 빛 파장의 약 절반정도까지 줄일 수 있으며 구체적으로는 아래 식과 같이 표현된다.

$$d(\mu\text{m}) = \lambda / (2NA)$$

여기서 λ 는 레이저빔의 파장을 NA는 렌즈의 개구수(numerical aperture)를 나타낸다.

일반적으로 레이저 가공의 경우 매우 정밀한 가공이 가능한 반면 생산성은 기계가공이나 반도체 가공에 비해 상대적으로 낮은 단점이 있다. 이와 같이 낮은 생산성을 극복

레이저산업 동향 및 전망

하고 매우 빠른 속도로 정밀한 가공을 가능하게 하는 광학계로 f- θ 렌즈가 있다. f- θ 렌즈는 대표적으로 레이저마킹, 천공, 미세용접 등과 같이 높은 생산성이 요구되는 분야에 사용되는데 기본적으로 그림3과 같이 구성되어 있다. 레이저마킹을 예로 들면 우선 원하는 패턴을 고속으로 생성하기 위해 2개의 고속회전 거울이 f- θ 렌즈 상단에 설치된다. 회전축이 서로 90°로 정렬된 거울은 회전각을 적절히 조합함으로써 평면상의 임의의 위치에 레이저빔을 보낼 수 있다. 이때 f- θ 렌즈에 입사되는 레이저빔과 렌즈 중심축 간의 각의 크기에 따라 평면상의 초점크기와 위치가 달라지는데, f- θ 렌즈는 화면상에서 렌즈 중심축과 초점사이의 거리가 각의 크기에 비례적으로 증가하며 초점크기도 위치에 상관없이 거의 일정하도록 설계된 렌즈로 대물렌즈와 같이 렌즈하우징(lens housing)안에 여러개의 렌즈가 들어 있는 형태로 구성되어 있다.

종래에는 고출력을 요하는 응용분야에서는 이산화탄소 레이저나 야그레이저가 주로 사용되어 왔다. 한편, 반도체 레이저는 반도체공정을 이용해 매우 작게, 특히 컴퓨터 칩처럼 작은 공간에 수백개를 나란히 만드는 것이 가능하므로 적절한 설계를 통해 각각의 반도체레이저에서 나오는 빛을 하나의 광섬유로 모으면 기존의 이산화탄소 레이저나 야그레이저와 비교할 만한 고출력 반도체 레이저를 만들 수 있다. 특히 반도체레이저는 크기가 작고 대량생산이 가능하므로 전체시스템의 크기가 줄어들고 출력단가도 싸게 할 수 있는 장점이 있어 최근 이에 대한 활발한 개발이 이루어지고 있다.

아울러 최근 광섬유레이저(fiber laser) 기술이 크게 발전함에 따라 광섬유레이저 시장이 급속히 성장하고 있으며 고출력 광섬유레이저의 경우 빔 특성이 우수하고 중간광학계가 거의 필요 없다는 장점으로 인해 용접, 절단 등과 같이 종래에 이산화탄소 레이저나 야그레이저가 주도하는 산업체 응용분야를 중심으로 응용이 크게 확대될 것으로 기대된다.

마지막으로 최근 약 10년간 레이저

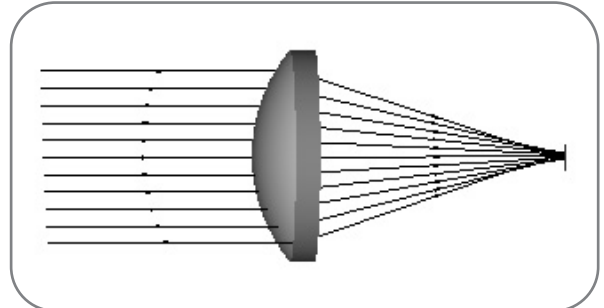


그림 2. 단순렌즈를 이용한 레이저빔의 집속

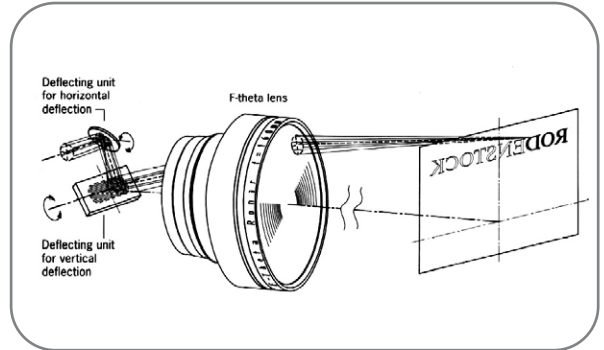


그림 3. f- θ 렌즈 및 갈바노미러를 이용한 광학계
(출처: Cascade Laser Corp)

응용분야에서 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 분야로는 1피코초(1피코초=10⁻¹²초) 이하의 극초단펄스를 이용한 분야가 있다. 극초단펄스는 원자나 전자의 이동을 측정할 수 있을 정도로 짧은 시간에 일어나는 현상을 바탕으로 초미세가공, 화학반응의 실시간 분석, 광통신에서의 테라헤르쯔(tera Hz) 전자기파 발생, x-선 발생 등과 같은 새로운 첨단기술의 개발 및 기존의 방법으로는 불가능한 영역의 물리화학적 현상 규명, 신기술개발 등을 가능하게 하므로 국내외적으로 매우 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 고등광기술연구소에서 극초단광양자빔 시설구축이 추진되고 있는 등 연구와 기술개발이 크게 확대되고 있다.