

<초청논문 >

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2017.5.1.053>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집: 대한기계학회 70 년과 기계산업】

21 세기 기계산업의 변화 - 광기술의 발전 동향[§]

주 기 남^{*†}

* 조선대학교 광기술공학과

Optical Technology of Mechanical Industries in the 21st Century

Ki-Nam Joo^{*†}

* Dept. of Photonic Engineering, Chosun Univ.

(Received February 16, 2016 ; Revised March 30, 2016 ; Accepted March 30, 2016)

Key Words: Optical Technology(광기술), Solid-state Lighting(반도체 조명), Optical Metrology(광계측), Dimensional Metrology(치수측정), Industrial Laser(산업용 레이저), Laser Processing(레이저 가공)

초록: 광기술은 차세대 산업 분야에서 기계, 전자와의 융합을 통한 첨단 산업의 핵심요소이다. 또한 광기술은 현재 신성장동력인 IT, 디스플레이, 자동차, 의료, 반도체 등 국내 기간산업 제품의 품질 및 기능을 향상시켜 고부가 가치를 창출할 수 있는 기초 원천 핵심 기술 및 응용 기술로 활용되고 있으며, 향후 첨단 산업 분야에서 광기술 활용도는 더욱 더 높아질 것으로 예상되고 있다. 본 논문에서는 오늘날 산업 분야에서 중요도가 점차 높아지고 있는 광기술의 발전 동향을 21 세기 기계 산업과 관련하여 설명한다. 특히 다양한 광기술 분야 중에서 보다 기계산업과 관련성이 높은 반도체 조명, 광계측, 산업용 레이저 및 레이저 가공 기술을 중심으로 발전 동향을 살펴본다.

Abstract: In this review paper, the trend for optical technology is described as the development of mechanical industries in the 21st century. Optical technology has been essential in various industries such as mechanical, electronic industries as the convergence technology. Based on the roadmap of optical science and technology, 12 working groups are categorized as the technical point of view and most of them are closely related to mechanical industries. Especially, solid-state lighting, optical metrology and industrial laser processing are important technologies in precision engineering and manufacturing. This paper introduces these optical technologies and their technological issues to look into the development trends and expectation.

1. 광기술 및 광산업의 분류

인류 문명의 초기부터 빛(light)은 물리학, 철학, 예술 분야에 걸쳐 많은 호기심을 유발하는 동시에 동경의 대상이었다. 아리스토텔레스와 프톨레마이오스 등과 같은 고대의 철학자들은 끝없는 탐구를 통해 빛의 본질에 다다르기를 갈구하였으며, 이러한 빛에 대한 연구는 17 세기에 이르러 체계적으로 발전하기에 이르렀다. 이에 따라 빛의 기하학적, 파동적, 전자기적, 양자광학적 성질들이 이론적으로 설명되고 실험적으로 검증되었으며,⁽¹⁾ 이러한 광학 이론들은 점차 사람들의 삶과 산업에 응용되기 시작하여 오늘날에는 빛이 없이는 상상할 수 없는 세상이 되었다. 빛은 단순히 어둠을 밝히는 전등에서 시작하여 기계

§ 본 논문은 편집위원회의 초빙에 의해 대한기계학회 창립 70 주년을 기념하여 발행한 <대한기계학회 70 년과 기계산업>에 수록된 내용을 재정리한 논문임.

† Corresponding Author, knjoo@chosun.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Categories of optical technology in the roadmap of optical science and technology 2011⁽²⁾

Working Group	광산업 및 광기술 분류	Working Group	광산업 및 광기술 분류
WG 1	광통신(optical communication)	WG 7	생명 및 의료광학 (Bio and medical photonics)
WG 2	디스플레이(Display)	WG 8	보안 및 방위산업(Security and defense)
WG 3	정밀광학기기 (Precision optical instrument)	WG 9	광계측(Optical metrology)
WG 4	태양광에너지(Solar energy)	WG 10	광소재 및 부품 (Optical materials and devices)
WG 5	반도체 조명(Solid-state lighting)	WG 11	차세대 광기술 (Next generation optical technologies)
WG 6	산업용 레이저 및 레이저 가공 (Industrial laser and laser processing)	WG 12	교육 및 연구(Education and research)

공학의 정밀산업에서 가공, 계측 분야의 필수 요소로, 또한 차세대 산업에서는 기계, 전자와의 융합을 통한 첨단 산업의 핵심요소가 되었다. 또한 광기술은 과거 국방 분야의 선도로부터 현재 신성장동력인 IT, 디스플레이, 자동차, 의료, 반도체 등 국내 기간산업 제품의 품질 및 기능을 향상시켜 고부가 가치를 창출할 수 있는 기초 원천 핵심 기술 및 응용 기술로 활용되고 있으며, 향후 첨단 산업 분야에서 광기술 활용도는 더욱 더 높아질 것으로 예상되고 있다. 이는 향후 기계산업에 있어서 광기술의 중요도 역시 매우 높아질 것을 예견한다.

2011 년도 지식경제부의 지원으로 한국광과학회에서 발간한 “2011 년도 국가광과학기술 로드맵” 에 따르면 광산업의 세계 시장 규모는 2005 년도 270 조원 수준에서 2008 년도 338 조원, 2010 년에는 386 조원으로 꾸준한 성장을 해 왔으며, 2011 년에는 413 조원, 2015 년에는 573 조원, 2020 년에는 850 조원에 이를 것으로 예상하고 있으며, 이러한 광산업은 세부 기술 분야에 따라 Table 1 과 같이 12 개의 분야로 분류하고 있다.⁽²⁾ 또한, 광과학기술은 IT, BT, NT 등과 결합하여 새로운 광융합기술로 발전하고 있고, 전자, 에너지, 자동차, 환경, 보안/방위, 의료 산업 등과 융합되어 새로운 광융합 산업을 창출하고 있다. 본 논문에서는 이렇듯 산업 분야에서 중요도가 점차 높아지고 있는 광기술의 발전 동향을 21 세기 기계 산업과 관련하여 되짚어보고자 한다. 물론 기계산업은 제조 산업의 근간을 이루는 기초 산업 분야를 모두 아우르기 때문에 모든 광기술 분야가 기계산업과 매우 밀접한 관련을 맺고 있으나, 본 논문에서는 이 중에서 기계산업과 보다 관련성이 높은 ‘반도체 조명’, ‘광계측’, ‘산업용 레이저 및 레이저 가공’ 기술을 중심으로 설명한다.

2. 반도체 조명

반도체 조명(Solid-state lighting)은 Fig. 1 과 같이 친환경, 저소비전력, 고효율, 장수명의 특징을 가지고 있어 오늘날 백열전구와 같은 기존 조명을 대체하고 있다. 이러한 반도체 조명의 대표적인 예는 반도체 접합부의 전자(electron)와 정공(hole)의 재결합(recombination)에 의한 전계발광(electroluminescence) 광원인 LED(Light-emitting diode)와 OLED(Organic LED)가 있다. 특히 세계적으로 백열전구의 사용을 규제하기 시작하고 반도체 조명의 가격이 하락하기 시작하면서 반도체 조명은 21 세기의 대표적인 광원으로 자리매김하였다. 반도체 조명의 대표적인 LED 는 무기화합물 반도체로 p 형 반도체와 n 형 반도체의 이종접합 구조를 가지고 있고 정공과 전자가 재결합할 때 반도체의 밴드갭(Band gap) 에너지 차이를 빛의 형태의 에너지로 방출하는 광전자 소자이다. 이에 반해 OLED 는 유기화합물 반도체로 HOMO 와 LUMO 라는 무기반도체의 밴드와 유사한 에너지 준위를 이용하여 역시 밴드갭 에너지만큼의 차이를 빛으로 발생시킨다.⁽³⁾ 이러한 OLED 는 LED 와는 달리 점, 선, 면 광원으로 모두 사용할 수 있는 다양성을 내포하고 있으며, 기저판이 휘거나 구부러도 빛이 발생한다. 현재 디스플레이 시장에서 LED 와 OLED 가 상용화되었으며 향후 UHD 급 이상의 해상도 구현을 위해 OLED 의 연구 개발이 계속적으로 진행 중이다.

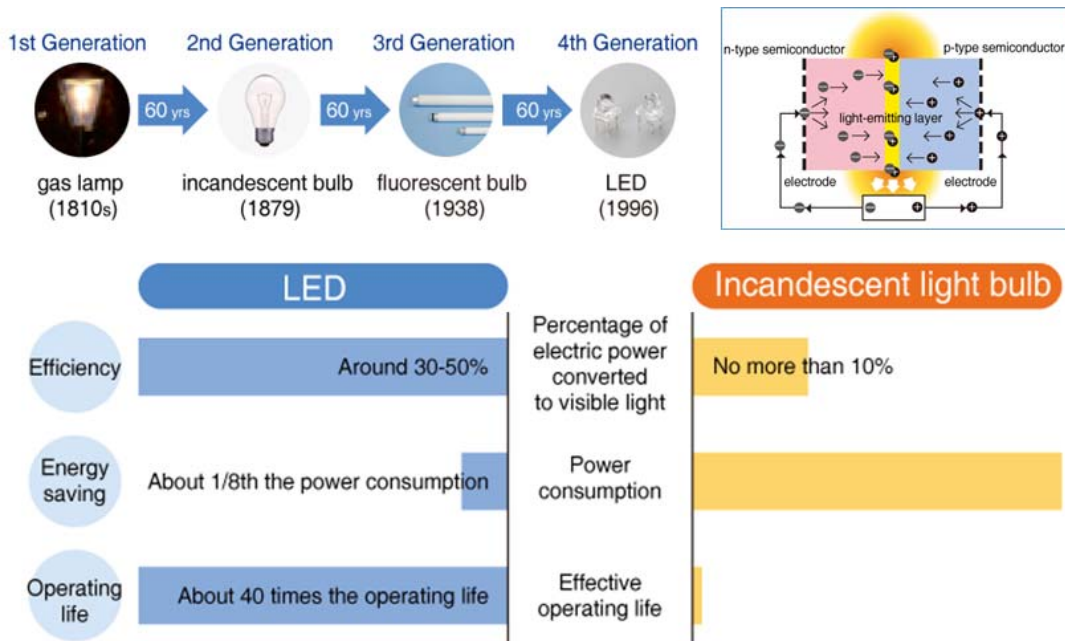


Fig. 1 Development progress of lighting and comparison between LEDs and incandescent light bulbs

반도체 조명은 제조공정 장비를 제외하더라도 오늘날 대부분의 조명시스템이 반도체 조명으로 대체되고 있고, 또한 기계산업의 핵심 중의 하나인 자동차 산업에 있어 조명이 반도체 조명으로 대체되고 있기 때문에 기계산업과 매우 밀접한 관련이 있다. 또한, 정밀 계측 분야에 있어 사용하는 조명 역시 반도체 조명으로 대체되었으며, 광융합기에 있어 반도체 조명은 필수 요소가 되었다. 기존의 열 발생이 심한 전구에서 반도체 광원으로의 전환은 정밀 기계 분야에 있어 정밀도 향상에 큰 영향을 주었으며 소형 및 경량화를 통해 시스템의 구성이 용이해졌다. 반도체 조명 분야는 크게 반도체 소재, 반도체 소자, 반도체 조명 시스템 분야로 나누어져 있으며, 각 분야에서 고효율 고휘력 반도체 칩 개발 및 색상 제어 기술 등이 핵심 기술로 많은 연구가 진행되고 있다. 향후 반도체 조명은 대면적 기관기술, 고효율 고연색성 반도체 조명 기술을 핵심적으로 개발하고 있으며,⁽²⁾ 이와 더불어 정밀 기계산업의 중요도가 매우 커지고 있다.

3. 광계측

기계산업 분야 중의 하나인 정밀산업에서 정밀계측 혹은 치수 측정(dimensional metrology)은 제품의 품질 및 성능 확보에 있어서 매우 중요한 요소 기술로, 그동안 제조 기술의 발달과 더불어 많은 진보를 이루었다. 20 세기의 계측 기술은 대부분 기계식 측정과 전자식 측정에 많은 의존도를 가졌다. 특히, Fig. 2 와 같이 기계식 측정의 대표적인 게이지 블록과 전자식 측정의 대표적인 센서인 LVDT, 정전용량센서(capacitive sensor)는 수 μm 에서 수십 μm 정도의 측정 불확도(measurement uncertainty)를 가지고 제품의 형상 및 길이를 측정할 수 있는 매우 유용한 도구였다. 그러나 20 세기 후반부터 제품의 형상이 μm 이하의 정밀도를 요구하기 시작하면서, 기존의 기계, 전자식 계측에 한계가 나타나기 시작하였으며, 비접촉식 정밀 계측이 가능한 광계측(Optical metrology) 기술이 활발히 연구되었다.⁽⁴⁾ 이러한 광계측 기술은 크게 변위(displacement) 측정과 표면 형상(surface profile) 측정 기술로 분류할 수 있으며, 변위 측정 기술의 대표적인 예로는 레이저 간섭계(laser interferometry)와 광학 스케일(optical scale)이 있으며, 표면 형상 측정 기술은 패턴조사기술(fringe projection), 간섭계(interferometry), 공초점 현미경(confocal microscopy) 기술이 있다.

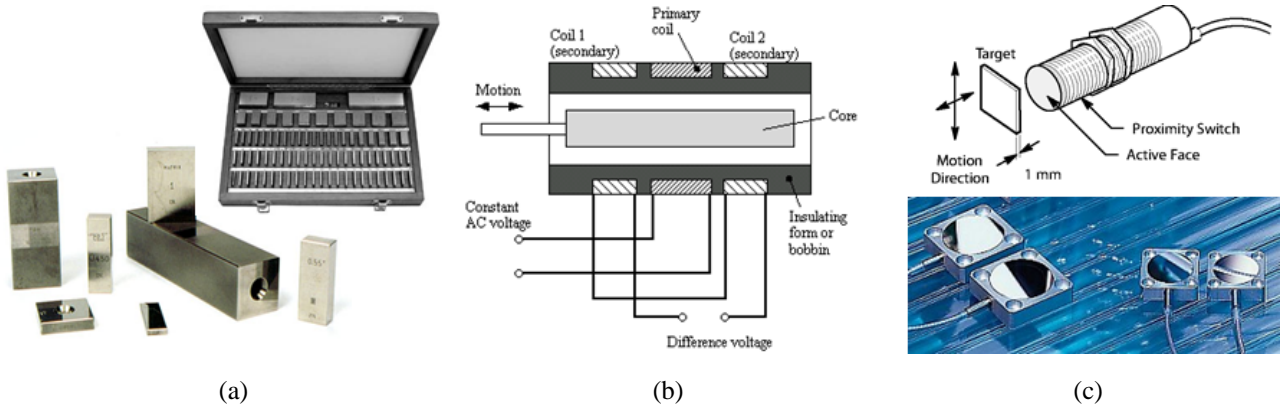


Fig. 2 Mechanical and electrical devices for dimensional metrology; (a) gauge block, (b) LVDT and (c) capacitive sensor

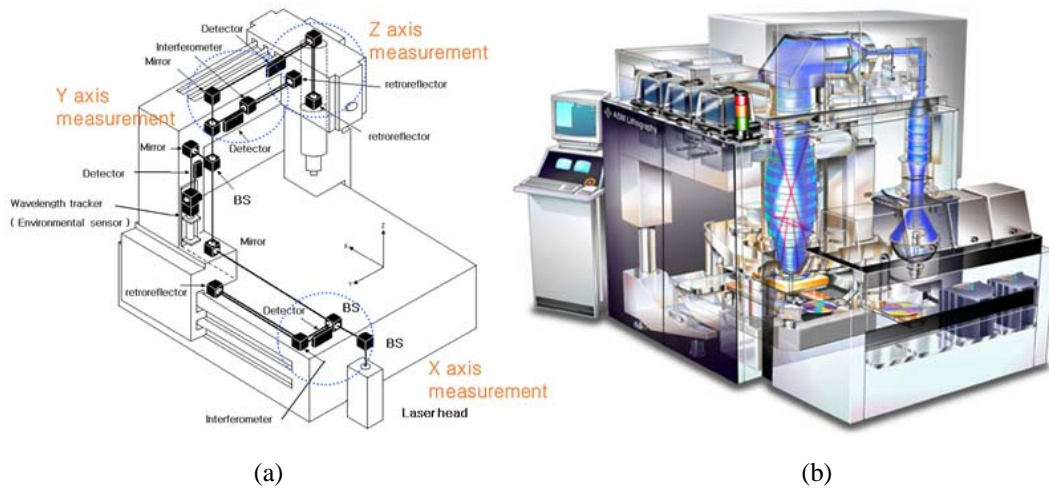


Fig. 3 Laser interferometers adopted in (a) coordinate measuring machine (CMM) and (b) lithography machine

변위 측정을 위한 레이저 간섭계 기술은 1970년대 Hewlett Packard 사가 개발한 헤테로다인 레이저 간섭계(heterodyne laser interferometer)가 상용화되면서 산업계에 널리 보급되기 시작하였다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 기존의 호모다인 간섭계(homodyne laser interferometer)와는 달리 이중 주파수에 의한 맥놀이 신호(beatting signal)를 사용하고 기준 신호와 측정 신호의 위상 차이를 검출하여 변위를 측정하는 기술로 신호잡음비(signal to noise ratio, SNR)가 매우 높은 장점을 가진다.

또한 수 m 이상의 긴 측정 영역에서 수 nm 수준의 분해능으로 변위를 측정하기 때문에, 헤테로다인 레이저 간섭계는 Fig. 3 과 같이 노광 장비(lithography machine) 및 3 차원 측정기(3D coordinate measuring machine) 등의 정밀구동장치의 위치 결정 제어를 위한 센서로 사용되고 있으며, 길이 표준에 직접적으로 소급(traceability)이 가능하다는 장점을 통해 정밀 구동장치의 보정용 센서로 활용되고 있다. 그러나 레이저 간섭계는 물리적 변위가 아닌 광학식 변위를 측정하기 때문에, 환경변화에 매우 민감하며 특히 공기 굴절률 변화에 취약하다. 이로 인해 최근 들어 공기 중에서 구동하는 정밀기기의 경우에는 레이저 간섭계보다 광학스케일을 사용하여 변위를 측정하고 있다. 광학스케일은 구동장치에 매우 미세한 격자를 설치하고, 이를 빛을 이용한 투과, 반사, 회절을 통해 격자의 수 및 방향을 판별한다. 미세 격자의 간격을 통해 변위를 측정하기 때문에 레이저 간섭계와는 달리 공기 굴절률에 대해 강한 장점이 있으나 구동

기 자체의 열적 효과로 인해 열팽창이 문제가 될 수 있어 이에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 현재 1 nm 이하의 분해능으로 변위를 측정한다.

한편, 표면 형상 측정 광계측 기술은 측정영역에 따라 응용되는 기술들이 달라지게 되는데, 이 중에서 패턴조사기술은 수십 mm² - m² 정도의 영역을 측정하는 분야에 널리 사용되고 있으며, 이는 자동차나 선박, 비행기 등의 차체 형상 측정 분야 등에 활용된다. 기존의 측정 방식은 기계식 접촉 측정 방법으로 대형 3 차원 측정기 등을 통해 측정 대상물의 표면을 접촉하여 3 차원 좌표를 통해 형상을 측정하는 방식이었으나, 긴 측정 시간 및 접촉 측정 등으로 인해 광계측 기술이 도입되었으며, 패턴조사기술은 Fig. 4 와 같이 일정한 패턴을 대상물에 조사하여 패턴의 왜곡을 통해 형상을 측정하는 방법으로 기존 측정 방법에 비해 비접촉으로 측정 시간을 크게 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 이에 반해, 측정 영역이 mm² 이하이고, 초정밀 측정을 필요로 하는 반도체, 디스플레이 분야에서는 주로 간섭계와 공초점 현미경 기술이 적용되고 있다.⁽⁵⁾ 20 세기에는 미세 측정 대상물의 2 차원 영상을 통해 제품의 결함 등을 검사하고 측정하는 것이 가능하였으나, 21 세기에 들어오면서 측정 대상물은 더욱 미세해지고 높이 방향의 정밀도를 요구하면서 표면 형상 측정 분야의 광계측 기술이 크게 발전하였다. 특히 간섭계 분야에서 백색광 주사 간섭계(white light scanning interferometer)는 Fig. 5 와 같이 가간섭성이 매우 낮은 광원을 이용한 국지적 간섭 신호를 통해 기존의 위상 천이 간섭계의 한계인 단차 측정을 가능하게 하는 동시에, 수 nm 수준의 매우 높은 정밀도를 가지고 있어 현재 산업계에 널리 사용되고 있다.⁽⁵⁾ 백색광 주사 간섭계는 측정 표면이나 기준 거울의 위치를 광축(optical axis) 방향으로 이송하면서 획득되는 간섭 신호의 정점(peak)을 검출하여, 그때의 정점의 위치로 표면 형상을 측정한다. 백색광 주사 간섭계는 반도체 패턴 측정에서부터 표면 거칠기 측정, 표면 패턴 측정, via hole 측정 등 미세 형상에 대한 삼차원 측정 전반에 널리 적용된다. 백색광 주사 간섭계의 가장 큰 장점은 측정 높이, 대물렌즈의 종류에 상관없이 nm 수준의 동일한 높이 측정 분해능을 구현할 수 있다는 점이다.⁽⁵⁾



Fig. 4 Application of fringe projection in mechanical industries

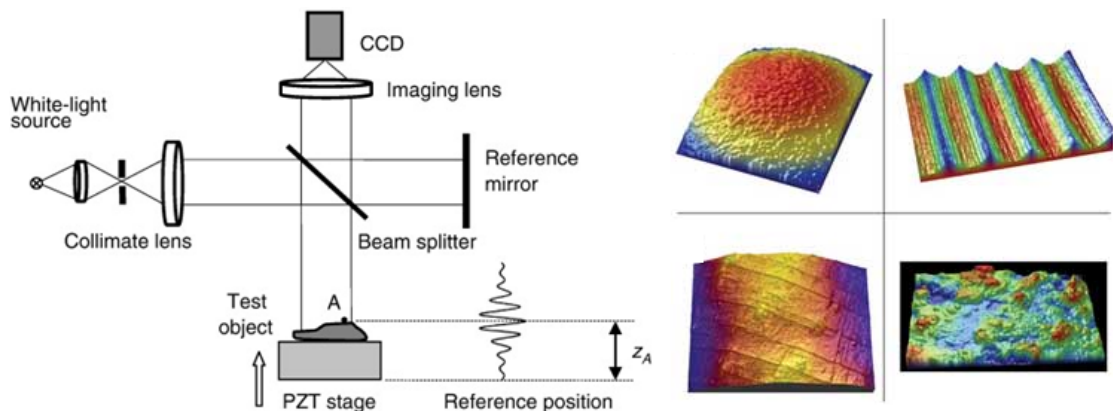


Fig. 5 White light scanning interferometer and its 3D measurement results

Table 2 Comparison between white light scanning interferometry and confocal microscopy

성능 항목	백색광 주사 간섭계	공초점 현미경
종축 분해능 (Longitudinal resolution)	수 nm	대물렌즈의 NA에 의해 결정
측정 속도 (Measurement speed)	간섭신호 획득으로 인한 속도 저하	가시도 획득에 의한 빠른 측정
측정 영역 (Measurement area)	대물렌즈에 의해 결정	대물렌즈에 의해 결정
측정 대상물 (Measurement target)	측정 대상물이 서로 다른 물질일 경우 오차 발생	-

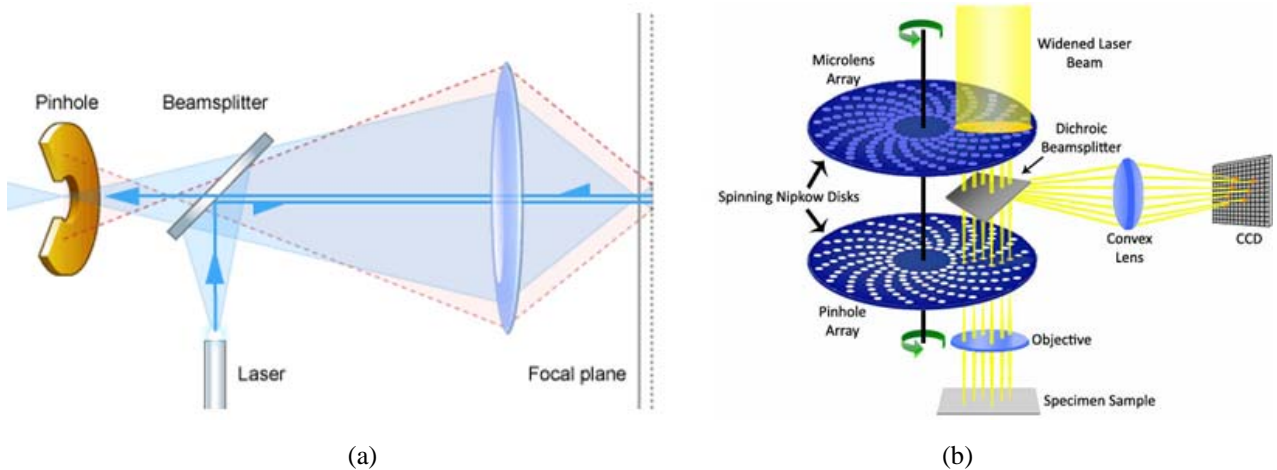


Fig. 6 (a) Basic configuration of confocal microscopy and 3D confocal microscopy using Nipkow disks and microlens array

공초점 현미경은 바이오 분야의 영상 획득을 위한 형광 현미경(florescence microscopy)에서 보다 선명한 상을 얻기 위한 개선 방법으로 처음 제안되었으며, 이후 산업계에서 3 차원 형상 측정 분야로 발전되었다. 공초점 현미경은 대물렌즈로부터 측정 대상물의 표면에 맺혀진 초점에서 반사한 광이 광검출기로 입사할 때, 구멍 크기가 매우 미세한 핀홀을 통과함으로써 배경광을 제거하여 선명도를 개선한다. Fig. 6 과 같이 측정 표면에서 광축 방향으로 초점이 맺혀지지 않는 경우, 광검출기(photo detector)에서는 광이 검출되지 않기 때문에, 결국 광검출기에서 측정되는 가장 높은 광량의 위치를 측정함으로써 측정 대상물의 높이 정보를 얻을 수 있다. 초기의 공초점 현미경은 측정 원리상 점측정(point measurement)만이 가능하였으나, 이후 미세구멍 배열판(Nipkow disk)과 렌즈 배열(microlens array) 등을 이용한 면적 측정이 가능해짐으로써, 오늘날 3 차원 형상 측정 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 공초점 현미경은 측정 원리상 종축 방향 분해능이 사용하는 대물렌즈의 NA에 의해 영향을 받으며 보통의 경우 저배율에서 분해능이 나쁜 단점이 있다. Table 2 는 미세 형상 측정 분야에서 널리 사용되는 백색광 주사 간섭계와 공초점 현미경을 비교하였다.⁽⁵⁾

최근 들어, 반도체 및 디스플레이 분야에서 생산되는 소자는 더욱 미세해지고 있으며, 이러한 소자들은 제조 공정시 수 nm 에서 수백 nm 수준의 얇은 박막 등이 층층이 쌓여 있는 구조로 만들어 지고 있기 때문에, 이들 박막 구조(film structure)의 3 차원 형상을 측정하기 위한 기술 개발이 매우 시급하다.

4. 산업용 레이저 및 레이저 가공(Industrial laser and laser processing)

현재 산업계에서 널리 사용되고 있는 산업용 레이저는 레이저 매질에 따라 Fig. 7 과 같이 CO₂ 레이저, 엑시머(excimer) 레이저, Nd:YAG 레이저, Yb:YAG 레이저, 다이오드 레이저(diode laser), 광섬유 레이저(fiber laser) 등이 있다. 이 중에서 다이오드 레이저는 주로 광섬유 레이저 및 고체 레이저의 펌핑용 광원으로 널리 사용되고 있으며, 다른 레이저들은 주로 레이저 가공 분야에 활용되고 있다. 사실상 산업용 고출력 레이저는 레이저 공진기 기술 자체도 매우 중요하지만, 레이저 발진이 펌핑용 다이오드 레이저 기술에 근간을 두고 있기 때문에 고출력 다이오드 레이저 개발은 산업용 레이저 개발에 있어서 필수적이라고 할 수 있다.

한편, 기계 가공 분야에 있어서 20세기 전후의 선반이나 밀링 등과 같은 전통적인 기계가공은 이후 정밀 산업의 발전과 함께 새로운 가공 기술을 필요로 하였으며, 이에 따라 정밀 미세 가공이 가능한 레이저 가공 기술에 대한 수요가 급증하였다. 또한, 종래의 기술로 가공이 어려웠던 물질에 대한 가공 관심 역시 레이저 가공에 대한 기대를 높였다. 1960년대에 발명된 레이저는 이후 다양한 레이저의 개발과 출력 증대로 인해 가공 분야에 응용되었으며, 현재 반도체, 전자, 자동차, 특수 재료 등의 첨단산업 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 레이저 가공은 μm 이하 크기의 가공이 가능하고 친환경적이며, 비접촉 공정이기 때문에 활용도가 점차적으로 높아지고 있다. 기존에 산업용으로 널리 사용된 레이저는 기체 레이저인 CO₂ 레이저로 10.6 μm 파장 영역에서 발진하며, CW(continuous wave) 모드에서 45 kW 정도의 고출력 레이저로 크기가 크고 많은 에너지를 필요로 하는 용접이나 수십 μm 에서 수 mm 수준의 금속, 세라믹 등의 소재 가공에 주로 활용되었다. 엑시머 레이저는 400 nm 이하의 파장 영역을 가지는 기체 레이저로 파장이 매우 작기 때문에, 반도체 가공의 노광 용도로 많이 활용되었다. 국내의 경우, 노광 장비 시장에 고정적 수요가 있으며, 더불어 미세가공 시장과 최근 AMOLED 디스플레이 공정의 핵심 기술인 LTPS(low temperature poly-silicon) 레이저 표면처리(laser annealing) 공정에 사용되기 때문에 계속적으로 수요가 증가하고 있다. 또한 레이저 기술의 개발로 효율이 비교적 높고 안정성이 높으며 작은 크기의 고체 레이저가 레이저 가공 분야에 사용되었으며, 대표적인 고체 레이저로는 1064 nm 파장 영역에서 발진하는 Nd:YAG 레이저가 있다. 최근 들어 가공용 레이저로 각광받고 있는 고출력 광섬유 레이저는 작고, 가벼우며, 효율이 높은 특징 등으로 기존 레이저에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 사실 광섬유

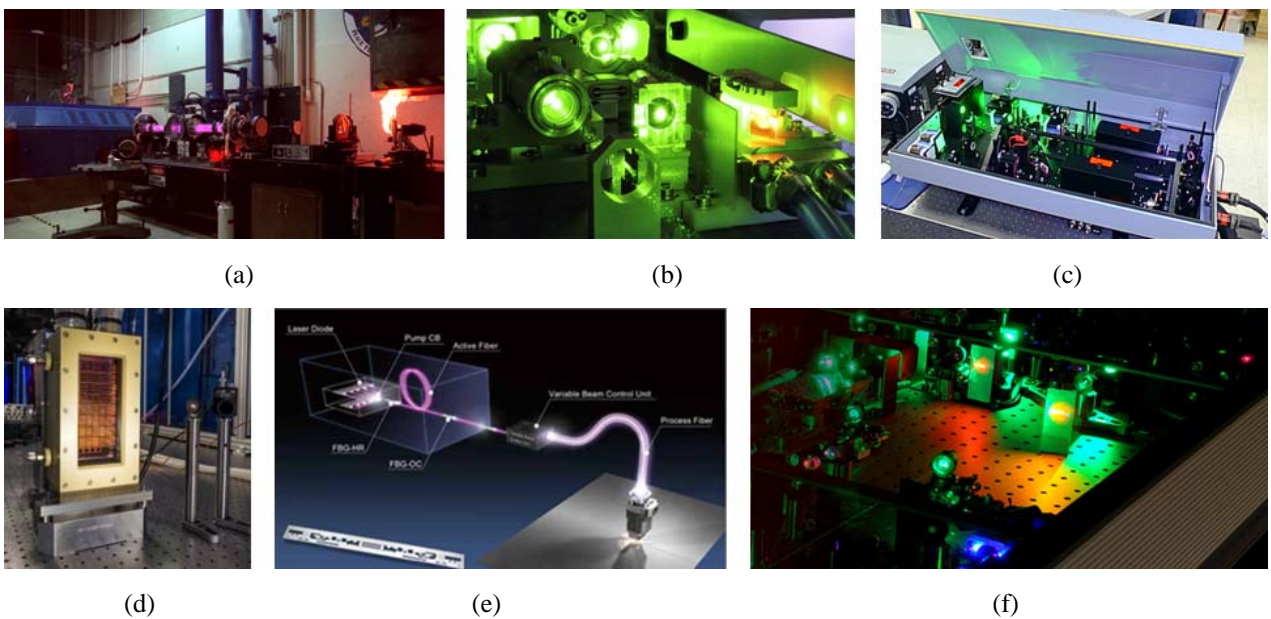


Fig. 7 Industrial lasers; (a) CO₂ laser, (b) Excimer laser, (c) Nd:YAG laser, (d) pumping diode laser, (e) fiber laser and (f) ultrashort pulse laser

레이저는 주로 광통신에 사용할 광원 개발을 목표로 연구해 왔고 상용화되었다. 하지만 광섬유가 가지는 저손실과 좋은 열적 특성 등은 기존의 고출력 레이저를 대체할 수 있는 새로운 레이저로 각광받게 되었고, 2000 년 초에 들어서 본격적인 고출력 광섬유 레이저 연구가 시작되어 현재 상용화 되어 있다. 또한 극초단 펄스 레이저(ultrashort pulse laser) 가공은 비교적 낮은 에너지 출력에서 높은 첨두출력(peak power)을 얻을 수 있는 장점으로 레이저가공에 응용되고 있다. 극초단 펄스 레이저 가공은 열이 주위에 전달되기 전 매우 짧은 시간 동안 레이저를 조사하기 때문에 Fig. 8 과 같이 주위에 열로 인한 표면구조 변화 없는 가공이 가능하며, 열손실이 적어 에너지 효율이 높다. 또한 펄스 제어를 통해 가공 정도가 우수하며 수 μm 에서 수십 μm 의 가공이 가능하고 투명물질의 가공이 가능하다는 장점을 가진다.⁽⁶⁾

레이저 가공은 대부분의 경우 가공되는 재료의 표면에서 높은 에너지 밀도를 얻기 위해 렌즈 등을 이용하여 집속된 상태로 조사된다. 그러나 이 경우 재료 표면에 조사되는 레이저 빔은 재료의 반사율에 따라 일부가 반사되고 투과된 에너지는 표면에서부터 빛의 세기가 계속적으로 감소하면서 재료에 흡수된다. 이때 흡수된 에너지는 열에너지로 변환되어 재료의 온도를 상승시키고 이에 따라 레이저가 조사된 영역에서 재료의 용융, 증발 등이 일어나 절단, 용접 가공이 가능해진다. 레이저 가공에는 Fig. 9 와 같이 용접, 절단, 마킹, 구멍 가공, 표면 처리 등이 있으며, 각각의 가공 분야에 있어 레이저와 물질 간의 상호 작용에 따른 물리적 현상을 확보하기 위해 레이저 출력, 펄스폭, 펄스 간격, 파장, 빔 모양 등의 변수들을 제어하기 위한 기술이 필수적이며 이에 따라 가공 정도가 달라지게 된다.

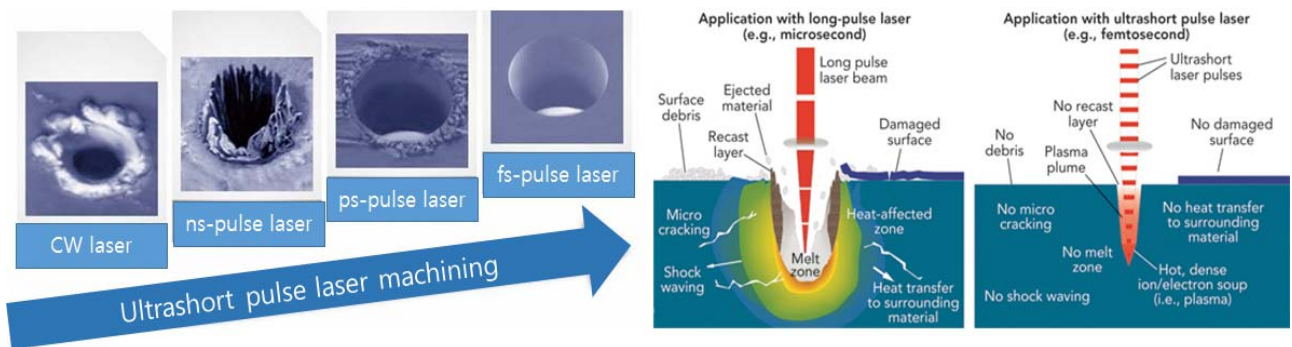


Fig. 8 Comparison between laser machining results by conventional lasers and an ultrashort pulse laser

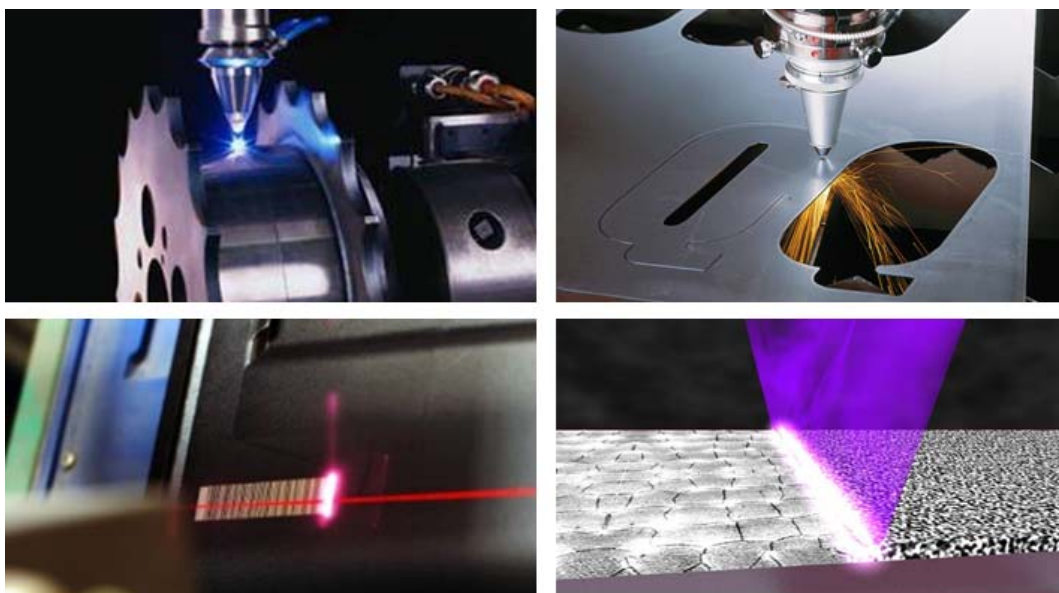


Fig. 9 Application fields of laser processing such as welding, cutting, marking and surface annealing

5. 결 론

지금까지 다양한 광기술 분야 중에서 비교적 기계 산업과 밀접한 관련이 있는 반도체 조명, 광계측, 산업용 레이저 및 레이저 가공 기술에 대해 서술하였다. 각각의 기술 분야의 특징은 20 세기 후반부터 연구가 급격히 진행되어 현재 상용화되어 있고, 향후 많은 연구들이 진행될 것으로 예상되는 분야이다. 이러한 광기술 분야는 서두에서 밝힌 바와 같이 광기술 자체로의 발전보다는 타산업과의 융합을 통해 발전할 것으로 예상된다. 특히, 제조 산업 분야의 기계 산업과의 융합을 통해 더욱 발전해 나갈 것으로 판단되며 자동차, 반도체 공정 장비, 가공 장비, 측정 장비들에서 필수적인 요소 기술 산업으로 성장해 나갈 것으로 기대한다.

참고문헌

(References)

- (1) Saleh, B. E., Teich, M. C. and Saleh, B. E., 1991, *Fundamentals of photonics*, Wiley, New York.
- (2) Optical Society of Korea, 2010, *Report for roadmap of national optical science and technology*, Ministry of Knowledge Economy.
- (3) Kitai, A., 2011, *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The role of the PN junction*, John Willey & Sons, Ltd.
- (4) Kim, S. -W., 2000, "Technological trends for precision optical metrology," J. of Korean Soc. Precis. Eng. Vol. 17, No. 6, pp. 7~16 and its references.
- (5) Conroy, M. and Armstrong, J., 2005, "A comparison of surface metrology techniques," J. of Phy. Vol. 13, pp. 458~465.
- (6) Lee, J. H., Sohn, H., Kim, J. G. and Shin, D. S., 2006, "Advanced laser micromachining technology," J. of Korean Soc. Precis. Eng. Vol. 23, No. 1, pp. 13~22.