

문화재 복원을 위한 레이저 세정 기술

이종명

(주)아이엠티, 레이저응용그룹, 경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

Laser Cleaning Technology in the Restoration of Artworks

Jong-Myoung Lee

Laser Engineering Group, IMT Co. Ltd.,
633-2 Goan-ri, Baekam-myun, Yoinin, Kyoungggi-do, KOREA

초록 1972년 이태리 베니스에서 J. F. Asmus에 의해 레이저를 이용한 석재 문화재 표면 세정의 가능성을 확인한 후, 많은 연구자들은 실험 및 검증의 과정을 통해 레이저 세정 기술이 기존의 기계적, 화학적 표면 세정 방법들과 비교해 여러 경우에 우수한 특성을 발휘한다는 사실을 인지하게 되었다. 이러한 인식의 확산으로 최근 유럽에서 레이저를 이용한 문화재 복원 연구가 활발히 진행되고 있으며, 석재, 유화, 스테인드글라스, 종이, 가죽 및 금속 문화재 복원에 있어 실질적 성공 사례들이 속속 보고되고 있다. 그러나 우리나라를 비롯한 동양에서는 이에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 논문에서는 문화재 복원을 위한 레이저 세정 기술에 대한 전반적 이해를 돕고, 실제 응용 사례 연구를 통한 기술의 유용성을 설명해 보기로 하겠다. 논문의 내용은 크게 세 부분으로 나누어, 첫번째로 레이저의 원리 및 레이저 빔의 특성에 관해 설명하였고, 두 번째로 레이저 세정 기술의 발전사 및 고유특성에 관해 서술하였으며, 마지막으로 문화재 유형별 세정 원리 및 다양한 실제 응용 사례를 제시하였다.

Abstract Since the feasibility for the application of laser to the conservation of artworks had been demonstrated by John F. Asmus at 1972 it was known from many experiments that laser cleaning technology provided superior characteristics over conventional cleaning methods based on mechanical and chemical actions. Then, the research and development of the cleaning technology was carried out strongly in Europe and many successful cleaning applications such as stone, painting, stained glass, paper, leather, and metal have been reported. However this is not familiar as a cleaning tool in the restoration of artworks in oriental countries including Korea. Therefore, this article aims to introduce a laser cleaning technology and its characteristics for the applications to art restoration. The contents in this article include general principles and characteristics of laser, the introduction of laser cleaning technology, and real laser applications for artwork restoration.

Key words: laser cleaning, restoration, artworks, conservation, stone, painting, metal

1. 서 론

1960년 레이저 빔이 등장한 이후, 불과 40년 만에 레이저는 우리의 생활에서 없어서는 안될 중요한 위치를 점유하고 있다. CD 플레이어에서 반도체 레이저는 데이터를 읽어 음악을 만들어 내며, 놀이공원에서는 환상적인 영상 쇼를 연출하며, 인터넷으로 세계를 잇는 광케이블에도 레이저가 정보를 전달하고 있다. 레이저가 프린터로 인쇄를 하고, 슈퍼에서 바코드를 인식하며, 양복을 재단하며, 산업체에서는 강판을 절단, 용접하며, 병원에서는 점과 여드름을 제거하고, 레이저 메스로 외과 수술 및 라식 수술도 행하여지고 있다. 이와 같은 레이저의 응용이 문화재 표면의 오염물질을 제거하는 목적으로 사용되고 있다 함은 그리 놀랄 일은 아니다.

최근 열악한 대기오염 및 이상기후 상태에서 문화재 표면의 손상 및 퇴화가 가속되고 있으며, 이에 대한 방지책 및 표면 세정을 비롯한 보존처리 기술의 중요성이 더욱 더 중요하게 되었다. 문화재 보존처리에 있어서 오염된 표면의 세정공정은 전체 공정에서 매우 중요하며 어려운 공정이다. 이는 문화재 표면층이 장구한 시간 동안의 물리적 입자와 화학적 변화(decay or corrosion)의 축적층으로 이루어져 있어, 그 실제의 분석이 어렵고, 오염층만의 선택적 제거가 쉽지 않기 때문이다. 이에 레이저 세정 기술은 기존의 표면 세정 방법인 기계적(미소마모법, 메스법), 화학적 세정 방법과 비교해, 표면의 오염층만을 선택적으로 제거할 수 있으며, 매우 정밀한 제거가 가능하다는 우수한 특성으로 인해, 최근 유럽을 중심으로 문화재 표면 세정을 목적으로 기술 응용 및 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 고에서는 아직 국내에서는 생소한 레이저 세정 기술을 소개하고자 한다. 상기 기술의 이해를 돕고자 레이저의 기본 원리 및 특성을 먼저 설명하였고, 세정을 목적으로 한 레이저 기술의 역사적 변천 및 검증 과정, 그리고 기존의 세정 방법과의 비교를 통한 차이점 및 장점을 서술하였으며, 마지막으로 문화재의 유형별 실제 응용 사례를 통해 레이저 표면 세정 공정의 메카니즘 및 그 제거 특성을 기술하였다

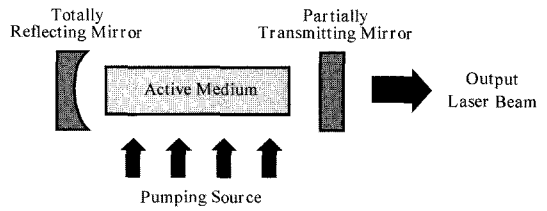


Fig. 1. Basic structure of laser resonator

2. 레이저의 원리 및 레이저 광의 특성

2.1. 레이저의 정의 및 발생원리

LASER란 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, 즉 “유도 방출에 의한 빛의 증폭”이란 말의 첫머리 글자로, 전자기파의 일종이다.^{1,3} 보통 우리가 일상적으로 접할 수 있는 태양광, 형광등과 같은 일반광과는 성질이 다른 독특한 형태의 빛이다. 레이저 발생의 기본 원리인 유도방출의 이론은 1917년 Albert Einstein에 의해 처음으로 제안되었으며, 1960년 미국의 과학자 T. Maiman은 인조루비를 사용하여 최초의 레이저빔 발진에 성공하였다.

레이저 광의 성질과 응용을 이해하기 위해서는 그 구조, 즉 레이저 광이 어떠한 과정을 거쳐 발진 되는 것인지를 이해하여야 한다. Fig. 1은 레이저 발진기의 기본 구조를 보여준다. 레이저는 크게 3가지 구성요소, 활성매질(active medium), 펌핑소스(pumping source), 광공진기(optical resonator)로 구성되어 있다.

Fig. 1을 이용해 레이저 발진 원리를 간단히 설명하면, 우선 램프 혹은 가스방전과 같은 펌핑 소스에서 강력한 에너지를 발생시키면, 활성매질(Maiman은 활성매질로 루비를 사용 하였음)은 발생된 에너지를 흡수하여 매질 내 원자들이 들뜨게 한다. 들뜬 상태의 원자(전자)는 매우 불안정하여 약간의 시간이 경과 후 저질로 바닥상태로 되돌아 온다. 이때 들뜸 준위와 바닥 준위 사이의 에너지 차이 만큼을 빛으로 방출하는데, 이를 자연방출(spontaneous emission)이라 부르며, 이때 방출되는 빛은 파장이나 위상이 고르지 않은 일반 자연광이다(Fig. 2 참조). 그러나 들뜬 상태의 원자에 외부에서 광원이 조사되면 이것이 자극이 되어 들뜬 상태의 원자가 바닥상

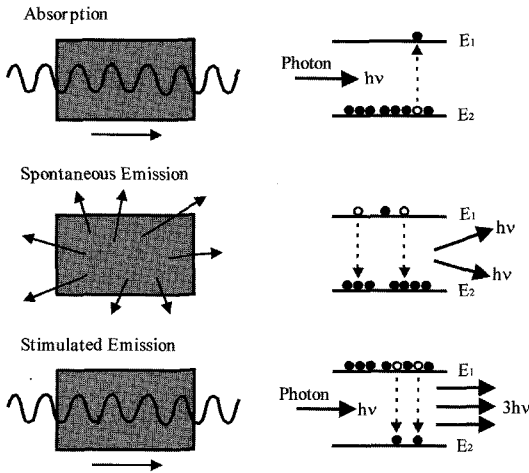


Fig. 2. Schematic illustration of light emissions by energy absorption

태로 천이하며 빛을 방출하는데, 이때 방출되는 빛은 입사 된 빛과 파장(진동수), 위상 및 편광이 동일한 빛이 방출된다. 이와 같은 과정을 유도방출(stimulated emission)이라 부르며, 이때 발생하는 빛이 레이저이다(Fig. 2 참조). 유도방출로 발생하는 레이저 광은 그 에너지가 충분하지 않아 광증폭이라는 과정을 거치는데, 이는 두개의 거울로 구성되어 있는 광공진기에 의해 이루어진다(Fig. 1 참조). 빛의 증폭은 전기 신호의 증폭과 달리, 빛을 거울 사이에서 지속적으로 반사 시킴으로써 실현된다. 잘 연마된 거울을 마주 놓고, 그 사이에서 발생한 유도 방출광을 왕복 운동 시킴으로써 들뜬 원자의 수를 증폭하고, 지속적인 들뜬 원자의 자극을 통해 새로운 레이저 광을 방출시켜 증폭해 간다. 이를 광증폭(light amplification)이라 하며, 이렇게 증폭된 레이저 광은 한쪽의 부분투과 거울을 통해 강력한 레이저 광으로 방출된다.

레이저의 종류는 유도 방출광이 발생하는 활성매질의 상태에 따라 크게 고체 레이저, 기체 레이저, 액체 레이저로 구분된다. 대표적인 고체 레이저로는 활성매질을 루비로 사용한 인류 최초의 레이저인 루비 레이저(694 nm)를 비롯해 Nd:YAG 레이저(1064 nm), 반도체 레이저 (780-1600 nm)등이 있으며, 기체 레이저로는 이산화

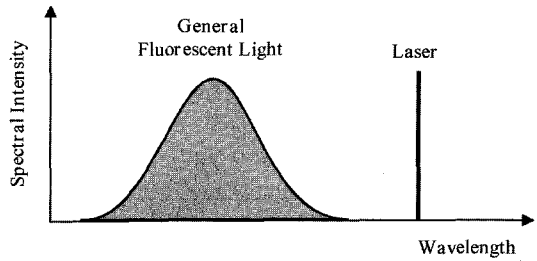


Fig. 3. Monochromaticity of laser beam

탄소(CO₂) 레이저(10.6 μm), 엑시머(excimer) 레이저(파장이 자외선 영역), He-Ne 레이저(633 nm) 등이 있으며, 대표적인 액체 레이저로는 물이나 알코올 같은 용매에 유기 색소를 녹여 활성 매질로 사용하는 색소레이저(300-1000 nm)가 있다.

2.2. 레이저광의 특성

레이저 광은 일반 자연광과 비교해 아래와 같은 독특한 특성을 가지고 있다.¹⁻³

2.2.1. 단색성 (Monochromaticity)

우리 주변의 모든 일반광은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 매우 넓은 파장 영역의 스펙트럼을 가지고 있으나, 레이저 광은 거의 단일파장의 매우 작은 밴드 폭(bandwidth)을 가지고 있다. 이는 레이저광이 유도방출에 의한 특정 진동수의 광자만을 발생시키기 때문이다. 이러한 단일 파장의 단색성은 특정 주파수만을 요구하는 광통신, 거리 및 속도 측정 등과 같은 분야에 이용되고 있다. 또한 렌즈를 통한 레이저 광의 집속시, 색수차(chromatic aberration) 현상이 발생하지 않아 아주 작은 사이즈(레이저 파장 크기)로 빔을 모을 수가 있어 매우 큰 에너지 밀도(W/cm²)를 얻을 수 있다(이를 레이저 빔의 응집성이라고도 부른다). 이와 같은 특성은 금속의 용접, 절단, 천공과 같은 고에너지가 필요한 재료 가공 공정으로의 응용을 가능케 한다. 레이저 세정 공정 또한 레이저 광의 단색성 및 응집성이 매우 중요한 효과로 작용하여 우수한 오염물질 제거 특성을 가지게 한다.

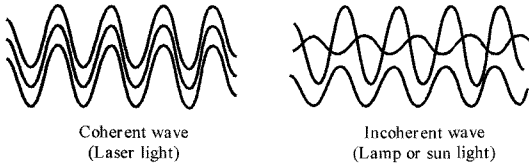


Fig. 4. Coherence of laser beam

2.2.2. 가간섭성(Coherence)

태양, 백열등과 같은 일반광은 광선의 위상(phase)이 시간적, 공간적으로 달라 전파 도중 서로 무작위로 간섭(interference)이 일어나 결과적으로 그 에너지가 상쇄되는데, 이를 비간섭성(incoherent) 광이라 부른다. 그러나 레이저는 그 위상이 시간적, 공간적으로 같아 에너지의 상쇄 없이 에너지를 유지할 수 있으며, 또한 특정 시간 및 공간에서 상을 정확히 예측할 수 있다(Fig. 4 참조). 이와 같은 레이저의 가간섭성은 홀로그램과 같은 3차원 영상 측정, 분광기 및 간섭기를 이용한 다양한 분석 장비등에 레이저가 사용되는 이유이다.

2.2.3. 지향성(Directionality)

Fig. 5에서 보이는 바와 같이 빛이 진행되는 방향성은 광원이 전구나 형광등과 같은 일반광인 경우 사방으로 전파된다. 이 때문에 1 W의 빛을 방출하여도 1 m 거리에서 단위 면적 당 에너지는 1 μW, 즉 100만분의 1 이하로 된다. 그러나 레이저 광은 지향성이 매우 좋아 1 m 뒤에서나 100 m 뒤에서나 거의 1 W(100%)의 광에너지가 유지된다. 이와 같이 에너지 손실이 거의 없이 목표 물체에 정확히 조준하는 레이저의 지향성(일명 조준성(collimation))이라고도 한다)은 도청을 방지할 수 있는 레이저 통신, 레이저 레이더, 기상관측과 같은 목적에 그 응용이 이루어지고 있다.

3. 레이저 세정 기술의 발전사 및 고유 특성

3.1. 레이저 세정 기술의 발전사

지금으로부터 약 40년 전 레이저 개발의 선구자 중에 하나인 Arthur Schlow는 레이저가 흰

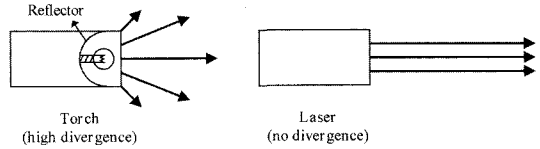


Fig. 5. Directionality of laser beam

종이 위에 검정색 잉크를 선택적으로 증발시키는 모습을 보고 이를 ‘레이저 지우개(laser eraser)’라 명명하였다. 이는 레이저가 가진 단색성에 기인된 다른 물질간의 흡수능(absorptivity)의 차이에서 비롯된 자연스런 결과이며, 이를 레이저 세정의 효시라고 이야기 하곤 한다.

이후 레이저 세정이라는 기술의 실제적 응용 가능성은 1972년 John Asmus에 의해 우연히 발견 되었다.^{4,5} 당시 이태리 Venice에서는 심한 대기오염, 홍수 등과 같은 자연재해로 시내에 산재한 많은 야외 조각물의 표면 훼손 및 파손이 큰 문제가 되고 있었다. 이때 그는 이와 같은 조각물의 3차원 영구기록 영상을 남기기 위해, 당시 첨단 기술인 레이저 홀로그램(hologram)을 이용한 조각물의 3차원 사진을 만드는 프로젝트를 수행하고 있었다. 그 옆에서 홀로그램 기록 작업을 보고 있던 한 석재 복원가가 기존의 석재 표면 피복방법(surface-divestment tool)인 화학적 및 마모적 방법을 이 레이저가 대신해 줄 수 없는냐는 제안을 하였으며, 사실상 단순한 3차원 영상의 보존 보다, 빠르고 안전한 표면피복 방법을 이용한 문화재의 구제(salvation)가 보다 적극적인 대처방법이라는 동의 하에 곧 바로 시험 시편을 이용한 테스트에 들어가게 되었다.

홀로그래피에 사용된 펄스파 루비레이저(pulsed ruby laser)를 이용해 표면 세정을 수행하였으며 결과는 대성공, 즉 모재표면(surface texture and geometry)의 아무런 손상 없이 표면 오염층만의 제거가 선택적으로 이루어짐을 알 수 있었다(Fig. 6 참조). 곧 이어 영국 런던의 Victoria & Albert 박물관 지붕 위에서는 기존의 기계적 및 화학적 세정 처리를 한 석재 시편과 레이저 세정을 통해 얻은 시편과의 실제 환경영향 실험(environmental-exposure test)을 약 2년간 실시하였으며, 이 결과 레이저 세정을 한 시편이 자연

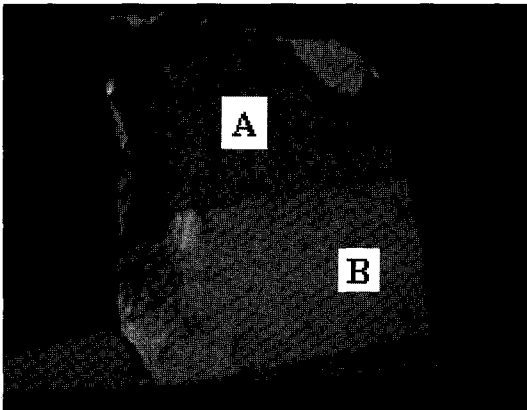


Fig. 6. Laser cleaning of sandstone (A: before cleaning, B: after cleaning)

풍화작용(natural weathering)에 훨씬 강하다는 사실을 1975년 발표하였다. 이후 UNESCO의 인증하에 베니스에 있는 Palazzo Ducale 기둥장식(capital)의 세정을 레이저로 성공적으로 수행하였으며, 이는 최초의 실공간(in-situ) 레이저 세정의 실제 응용사례로 여겨지고 있다(1975년). Fig. 7는 그 당시의 레이저 세정 장면이며, 이때 사용된 레이저 역시 홀로그래픽 루비 레이저(holographic ruby laser)를 사용하였다.

레이저를 이용한 석재 기둥장식(Palazzo capital)의 성공적 세정 결과에도 불구하고 문화재 보존 사회의 보수성 및 당시 열악한 레이저 시스템의 신뢰성은 레이저 세정 기술의 폭 넓은 확산에 어려움을 제공하였으나, 90년대 들어 꾸준한 레이저 및 광학기술의 발전 그리고 시스템의 신뢰성 확보로 인해 레이저 세정 기술은 문화재 복원을 위한 중요한 공정 기술로, 현재 유럽을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 레이저 세정 기술은 문화재 복원으로서의 응용 뿐만이 아닌, 주근깨, 반점, 털, 치석 및 충치 제거등과 같은 의학적 용도로, 항공기 페인트 제거, 타이어 몰드(mold)의 찌꺼기 제거, 반도체 표면 이물질 제거 등과 같은 산업적 목적으로의 그 응용이 크게 확산되고 있다.^{6,8}

3.2. 기존의 세정 방법과의 비교 특성

만일 아주 연약하고 깨지기 쉬운 모재 표면 위

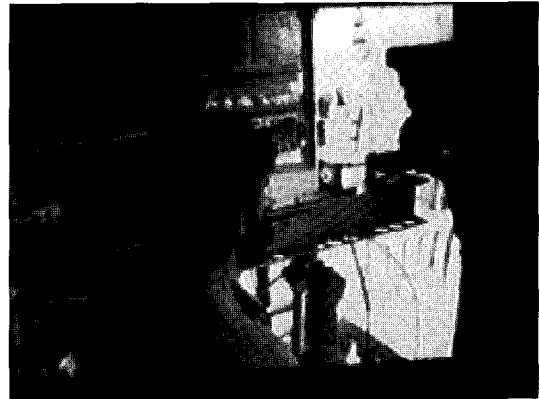


Fig. 7. The first laser cleaning application using Ruby laser in 1975

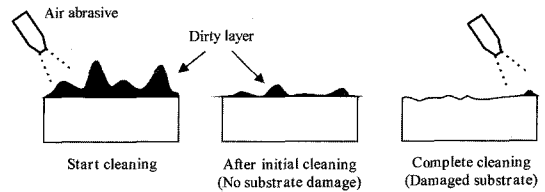


Fig. 8. Surface cleaning by mechanical abrasive method

에 오염입자들이 강하게 부착되어 있다고 하자. 성공적인 세정의 모습은 취약한 모재의 어떠한 손상 없이 표면의 오염입자들만을 제거하는 것이다. 이와 같은 목적 달성을 위해 기존의 대표적인 방법인 미소 마모법(micro-abrasive) 및 화학 용제(chemical flux)를 이용한 기계적 혹은 화학적 방법을 적용할 수가 있다.

기계적 마모법을 사용 시 보통 미세 유리 또는 모래입자를 적절한 공기압과 함께 분사시켜 표면의 오염물질과 충돌을 시킴으로써 물리적 힘에 의해 오염층의 제거가 일어나게 된다. 오염층의 제거가 이루어진 후 계속적인 입자의 충돌은 취약한 모재 표면의 손상을 야기하게 된다 (Fig. 8 참조).

표면 세정을 위해 화학 용제를 적용한다 하자. 일정하지 않은 오염층 두께로 인한 균일한 세정을 이루기가 쉽지 않으며, 용제에 과대 시간 노출은 모재의 과도한 세정 현상을 발생시키며 전체적인 표면 형상의 변화를 가져온다(Fig. 9 참

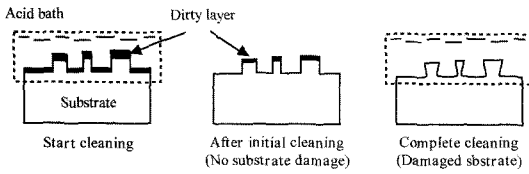


Fig. 9. Surface cleaning using chemical flux

조). 특히 모재 표면이 굴곡이 심한 복잡한 형상 일 경우, 세정 깊이 제어가 어려운 화학적인 방법은 모재의 부식과 같은 더욱 큰 문제를 야기 시키기도 한다. 또한 사용된 용제의 폐기에 따른 환경문제 및 후처리에 따른 비용문제는 최근 산업사회에서 크게 부각되고 있는 이슈이다.

기존의 기계적 및 화학적 세정 방법과 레이저 세정이 다른 가장 큰 특징은 레이저 세정의 가진 오염물질만의 “선택적 제거 능력”이다. 이는 레이저가 가진 고유 특징인 단색성에 기인한다. 만일 모재와 오염층의 물성 차이가 크지 않고 레이저 빔의 흡수능(absorptivity)이 모재보다 오염층에서 크다고 가정한다면(예로 white marble 위의 black encrustation), 레이저빔 조사시 오염층 표면은 효과적인 레이저 에너지의 흡수로 빠른 온도 증가가 발생하며, 오염물질의 증발온도 이상으로 온도가 상승하면 오염층의 제거가 발생한다. 표면 오염층의 제거 후 다시 인입되는 레이저 빔은 모재가 갖는 작은 흡수능으로 인해 대부분의 레이저 에너지는 단순히 표면으로부터 반사되며, 흡수된 레이저 에너지는 모재 표면에서 미약한 온도의 증가를 가져온다. 결과적으로 레이저 빔은 모재의 손상 없이 선택적으로 오염층만을 제거할 수 있게 된다(Fig. 10 참조). 이와 같은 현상을 “self-limiting nature”라고 부르며, 이는 레이저 세정이 가지고 있는 독특한 성질이라 말할 수 있다. 이상과 같이 설명한 레이저 빔에 의한 광열적 효과(photo-thermal effect)는 레이저 세정의 가장 기본적 원리로 간주되며, 실제적으로 많은 응용사례에서 위와 같은 메커니즘이 재배적으로 작용하고 있음이 증명되고 있다 (예로 금속 표면 위의 페인트 제거시, 상아(ivory) 표면 위의 오염물 제거시 등).

지금까지 설명한 광열적 효과는 레이저 세정

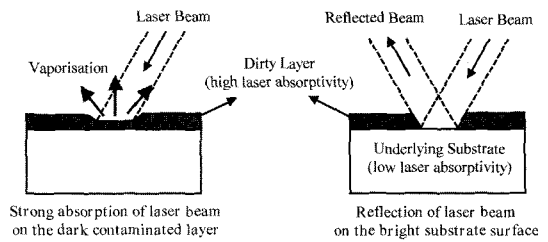


Fig. 10. Basic principle of laser cleaning (self-limiting nature)

시 발생하는 기본 현상으로 간주되나, 사용되는 레이저의 종류 및 반응 재료의 종류에 따라 이외의 다양한 세정 메커니즘이 나타나고 있다. 즉 광열적 효과 외에 기계적 효과 및 광화학적 효과(photo-chemical effect)가 경우에 따라서 주요한 세정 메커니즘으로 작동하며, 보통의 경우는 이러한 효과들이 혼재 되어 발현함으로써 표면 세정이 이루어 지고 있다.^{9,10}

레이저가 가지고 있는 단색성, 조준성, 그리고 짧은 펄스(nanosecond order) 사용에 의한 극도로 제한된 반응은 레이저 세정이 기존의 기계적, 화학적 세정 방법들과 비교해 아래와 같은 고유 특성을 가지게 한다.^{11,12}

- (1) 레이저의 단색성을 이용한 오염물질만의 선택적 제거가 가능하다.
- (2) 아주 짧은 레이저 펄스(보통 Q-switched laser 사용)를 사용하므로 정밀한 오염층 제거가 가능하다.
- (3) 외부로부터 기계적 부하(load)를 모재 표면에 가하지 않는 표면릴리프(surface relief) 공정이다.
- (4) 비접촉식 공정이므로 접촉 마모가 발생하지 않는다.
- (5) 레이저에 의해 유기된 고온 효과로 표면 위에 존재하는 유기물 박멸에 의한 표면살균 효과가 있다.
- (6) 광 에너지 사용에 따른 공정의 자동화가 용이하다.
- (7) 어떠한 오염물질도 배출하지 않는 건식 세정 공정이기 때문에 환경 친화적이다.

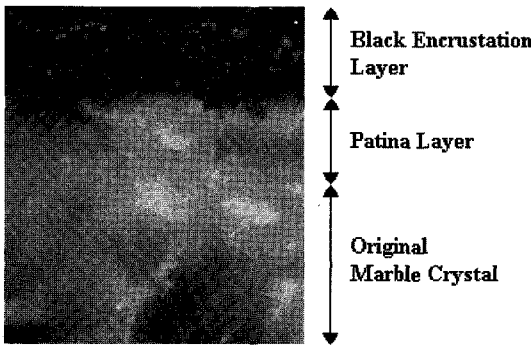


Fig. 11. Typical cross-section of the polluted marble

4. 유형별 세정 원리 및 사례 연구

4.1. 석재 복원으로의 응용

대표적인 기계적 세정 방법으로는 미소입자 충돌법(micro-particle blasting)과 워터젯(water jet) 방법이 있다. 이들 방법들은 입자 및 유체가 작업물과 직접접촉 함으로서 표면의 오염층을 제거한다. 이는 접촉시 표면에 발생하는 기계적 부하로 인해 모재의 손상 가능성이 크고 공정의 제어가 쉽지 않아 복원가의 숙련된 기술과 전문적 판단을 요구한다. 이에 반해 레이저 세정 기술은 기존의 세정 방법들과 비교해 뚜렷한 장점을 가지고 있으며, 특히 석재 복원에 있어 우수한 특성을 발휘하고 있다.

석재 복원에 있어서 레이저 세정의 기본 원리 및 대표적 성공사례를 살펴보자.

4.1.1. 기본 원리

세정 하고자 하는 석재 유물의 단면구조 고찰을 통해 레이저를 이용한 석재 표면 세정의 원리를 쉽게 이해할 수 있다.¹³ Fig. 11은 오염된 대리석(marble)의 전형적인 단면구조를 보여주고 있다. 사진에서 보여지는 바와 같이 크게 3 영역으로 구분되어 진다. 맨 위층은 우리가 제거함을 목적으로 하는 오염 각피층(black encrustation layer)로 두께는 약 0.1-0.5 mm이다. 그 아래 약 0.1 mm 두께의 중간층은 일명 '파티나(patina)'라 불리우는 퇴화층(decayed marble layer)이다. 이 퇴화층은 오랜 세월동안 대기중의

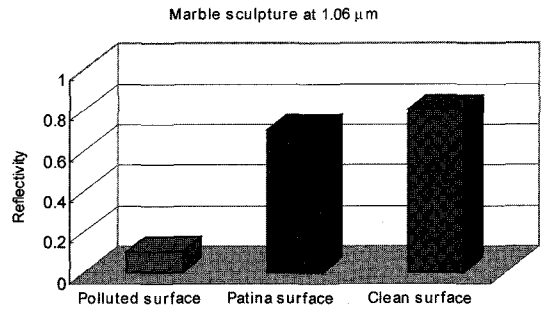


Fig. 12. Laser beam reflectivity for different surfaces (wavelength: 1.06 μm)

산성(acidic) 가스와 대리석 표면과의 상호작용에 의해 형성된 층으로, 대리석 조각품의 자세한 표면형상을 보존하고 있어 복원을 위한 표면 세정 시 보존되어야 한다. 마지막으로 맨 아래층은 원형 대리석층(original marble crystal layer)으로 아주 밝고 깨끗한 결정으로 이루어져 있다.

Fig. 12는 각각의 영역에서 레이저빔의 반사 정도를 보여준다. 파장이 1.06 μm인 Nd:YAG 레이저 빔의 반사도(reflectivity)는 오염층에서 약 0.1, 파티나층에서 약 0.7, 원형대리석층에서는 약 0.8 정도이다. 결과적으로 오염층은 레이저 에너지의 대부분을 표면에서 흡수함으로써 효과적인 온도증가를 피할 수 있으나, 반사도가 작은 파티나층과 대리석층에서는 대부분의 레이저 에너지가 표면으로부터 반사됨으로써 상대적으로 미소한 온도증가만이 이루어진다. 결과적으로, 이러한 큰 반사도의 차이는 대리석 모재(파티나 포함)의 손상 없이 선택적으로 표면 오염층을 증발시켜 제거할 수 있게 된다(이때 물론 적절한 레이저 에너지의 선택 및 제어는 기본적으로 중요하다). 이와 같이 레이저의 단색성에 기인된 물질의 선택적 제거 능력 혹은 'self-limiting nature'는 석재 복원에 있어 가장 기본이 되는 세정 원리이며, 대부분의 레이저 석재 복원 시 실제로 잘 나타나고 있다.

4.1.2. 실제 응용 사례

레이저를 이용한 실제 석재 복원 사례가 Fig. 13에 나타나 있다.¹⁴ 레이저 복원에 사용된 석재

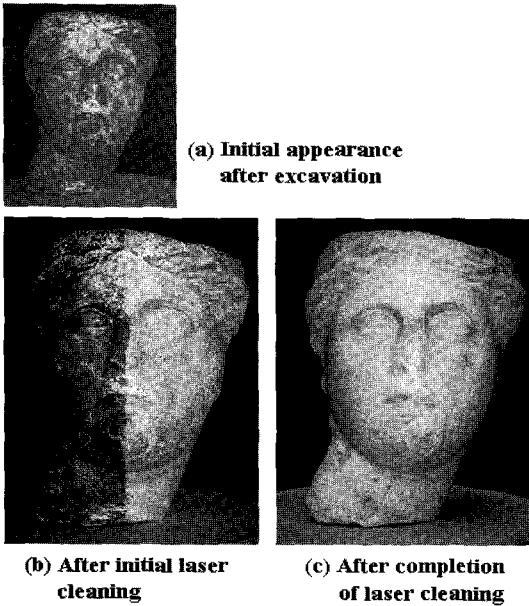


Fig. 13. Laser surface cleaning of BC 2C Greco-Roman Marble Head

유물로는 영국 Shropshire에서 발굴된 Greco-Roman marble head로 BC 2세기 조각품으로 추정된다. Fig. 13 (a)는 발굴 초기의 사진을 보여준다. 발굴 직후 표면은 흙과 백회(whitewash)로 덮여 뚜렷한 형상 파악이 어려울 정도였다. Fig. 13 (b)의 오른쪽 영역은 작은 에너지 밀도를 가진 Nd:YAG 레이저 빔을 이용해 표면에 붙어있던 대부분의 흙을 제거한 모습을 보여준다. 상대적으로 높은 에너지 밀도의 레이저 빔을 조사시, 남아있던 백회의 제거가 가능하며, 최종적으로 세정이 끝난 후의 모습이 Fig. 13 (c)에 나타나 있다.

위와 같이 레이저를 이용한 실제 문화재 복원시 대단한 주의와 집중이 필요하며, 혹시나 발생할 수 있는 모재의 손상 방지를 위해 큰 레이저 스폿 사이즈(spot size: 보통 2 mm 이상)를 사용해 인입 되는 레이저 빔의 에너지 밀도를 작게 하며, 낮은 레이저 주파수(frequency: 보통 2 Hz 이하)를 사용해 세정을 조심스럽게 수행한다.

4.2. 그림 복원으로의 응용

기존의 유화 복원 방법으로는 scrubbing 또는

blasting과 같은 기계적방법 또는 적절한 약품 사용에 의한 화학적 방법이 있다. 기계적 방법은 그림 표면 결(texture)의 손상을 쉽게 유발하며, 화학적 방법 또한 약품이 그림 안으로 침투함에 따른 색소의 손상이라는 치명적 약점을 보여주고 있어 보다 성공적인 세정 툴(cleaning tool)의 필요가 절실한 분야이다.

레이저에 의한 성공적인 그림(서양에서 그림은 대개가 유화)의 복원은 석재복원과 비교해 상대적으로 늦은 1992년에 첫번째 성공 사례가 보고되었다.¹⁵ 이는 그림의 복원이 석재에 비해 쉽지 않았음을 의미하며, 그 이유로는 상대적으로 캔버스 위의 유화층과 그 상면의 오염층이 매우 얇아(micron order) 정밀한 제어가 필요하고, 석재와 같은 뚜렷한 ‘self-limiting nature’를 가지고 있지 않아 오염물의 선택적제거가 쉽지 않기 때문이다. 결과적으로 레이저를 이용한 그림의 복원은 극도로 제어된 공정 파라미터와 세정 공정의 감시 및 진단 방법과 같은 고도의 기술을 필요로 한다.¹⁶⁻¹⁸

4.2.1. 복원의 분류 및 기본 원리

일반적으로 그림(유화)의 복원 처리라 함은 아래와 같이 크게 3가지 영역으로 나뉜다.

(1) 그림 표면의 오염물질 제거: 색소(pigment)의 손상 없이 그림 최상층에 형성된 오염층(varnish 포함)의 제거가 목적

(2) 그림 보강 재료(canvas, wood)의 세정: 그림 접합(paint adhesion)에 악영향을 미치는 보강재 표면의 이물질(dirt 또는 micro-organisms)의 제거가 목적

(3) 원형 그림(original painting) 위의 덧그림(overpainting) 제거: 원형 그림의 복원을 위해 과거 고의적 혹은 반달이즘(vandalism)에 의해 덧칠해진 그림의 제거가 목적

레이저를 이용한 그림 복원의 기본 원리를 쉽게 이해하기 위해, 위 3가지 복원 영역 중 첫번째인 그림 표면의 오염물질 제거를 예로 들어보자. Fig. 14는 전형적인 유화의 단면 구조를 나타낸다. 바탕재료가 되는 캔버스(canvas) 위에 바탕층(ground layer)이 씌워져 있으며, 이 위에 그림이 그려지며 색소층(pigment layer)를 형성한

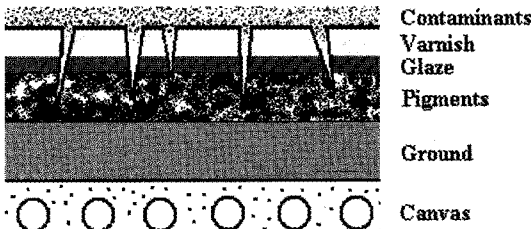


Fig. 14. Typical cross-section of the old painting

다. 보통의 경우 색소층의 두께는 100 μm 이하이다. 그림의 완성 후 표면에는 광택의 목적으로 그레이징(glazing)을, 그림의 보호를 목적으로 바니쉬(vernish) 코팅을 수행한다. 보통의 경우 바니쉬층의 두께는 수십 μm 이다. 그리고 그 위에 시간의 흐름에 따른 표면 오염층이 존재하게 된다. 보통 표면 오염층의 두께는 수십 μm 에 이른다. 결론적으로 성공적인 그림의 복원을 위해서는 아주 얇은(micron order) 표면 오염층과, 이로 인해 오염된 약간의 바니쉬층을 제거하여야 하며, 결과적으로 극도의 정밀함이 요구되는 세정 도구(cleaning tool)가 요구된다.

위와 같은 요구는 자외선 영역(100-380 nm)의 파장을 가진 엑시머(excimer) 레이저의 사용으로 구현되었다. 자외선 파장 레이저가 가진 큰 광자 에너지(photon energy)는 오염물질의 결합(bond)을 직접 끊음으로써 열적 효과 없이 효과적으로 오염물질만을 제거할 수 있게 된다. 이를 레이저에 의한 광화학적 효과(photo-chemical effect)로 부르며 엑시머 레이저와 같이 자외선 영역의 단파장을 가진 레이저 사용 시 주요한 세정 메카니즘이다. 또한 단파장 및 나노초대(nanosecond order)의 짧은 펄스 폭(pulse width) 레이저의 사용은 광학적, 열적 침투깊이(optical and thermal penetration depth)를 극도로 제한한다. 즉 조사된 레이저 빔은 표면 상부 얇은 표피층에서 상호작용이 일어나, 적절한 파라미터의 조절 시 아주 정밀한 제거 깊이의 제어(removal depth control)가 가능해진다. 보통 그림 복원을 위해 엑시머 레이저를 사용하는데 펄스 당 제거 깊이(ablation depth)는 1 μm 이하이다(Fig. 15 참조). 결과적으로 복원하고자 하는 그림에 대한

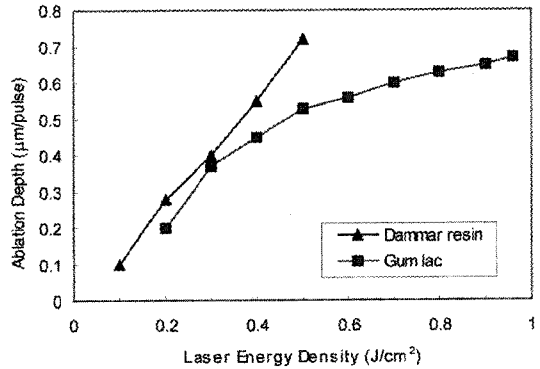


Fig. 15. Ablation depth with laser energy density using KrF excimer laser

충분한 이해 및 철저한 분석, 그리고 적절한 진단기술의 병행 사용 시, 수십 μm 의 오염층 및 바니쉬의 정밀제거를 가능하게 된다.

4.2.2. 실제 응용 사례

대표적인 레이저 응용 성공사례가 Fig. 16에 보여진다.¹⁵ 이는 17C 초상화(painting icon)로 복원가들이 기존의 기계적, 화학적 방법으로 복원에 실패한 작품이었다. 이를 Fotakis 등이 레이저를 이용한 복원을 시도하였으며, Fig. 16 (b)에서 보이는 바와 같은 놀라운 성공 결과를 얻었다. 이때 사용된 레이저는 KrF 엑시머 레이저(파장이 248 nm)로 극도의 제어 환경에서 표면 위 다양한 물질(dirt, fungi, organic & inorganic compounds)로 이루어진 오염층을 성공적으로 벗겨냄으로써, 내용의 파악조차 힘들었던 그림을 내부 색소의 손상 없이 완벽히 복원하는데 성공하였다. Fig. 16은 레이저가 그림 복원에 있어 가장 효과적인 세정 방법으로 위상을 확고히 하는데 공헌을 한 대표작품이기도 하다.

4.3. 금속 복원에서의 응용

기존의 금속 표면 세정 방법으로는 스칼펠(scalpel) 등과 같이 예리한 도구를 이용한 박피법 및 미소마모가루를 공기과 함께 분사해 오염층을 제거하는 입자마모(air-abrasive) 방법을 사용한다. 현재 금속 유물 복원에 있어 레이저를 이용하는 방법에 대한 연구 및 보고가 미미한 실

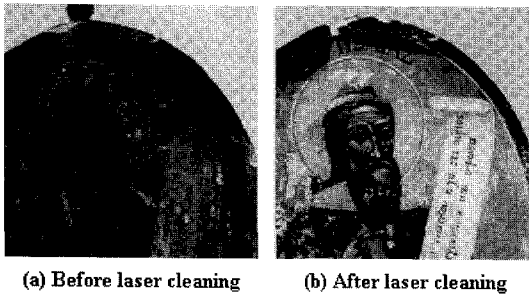


Fig. 16. Laser surface cleaning of 17C Painting Icon

정이다. 이는 다른 재료들과 비교해 금속표면의 오염층이 주로 금속 산화물, 부식물들로 이루어져 있는데, 레이저 빔의 조사 시 이러한 오염층은 쉽게 용융(melting)이 이루어져 표면 손상을 야기하기 때문이다. 또한 부식된 오염층은 아주 복잡한 구조 및 양상을 띄고 있어 분석 또한 용이하지 않으며, 부식 표면 또한 상당히 거칠어 레이저 빔에 의한 균일한 제거가 어렵다는 단점 등이 나타나고 있다. 그러나 귀금속(Au, Ag 등)과 같이 상대적으로 안정된 표면을 가진 금속은 표면 오염 정도가 심하지 않아 레이저의 응용이 상대적으로 용이하나, 이에 대한 연구도 미미한 실정인어서 앞으로 많은 연구를 수행해야 할 대상이기도 하다.

Fig. 17은 19C 스웨덴 귀족들이 입고 다니던 의복에 사용된 은(Ag)으로 만들어진 천으로, 구성하고 있는 하나의 실 가닥(thread) 구조를 살펴보면 Fig. 17 (b)와 같이 은 리본이 중심의 비단 가닥들(silk bunch)을 둘둘 말아 하나의 실 가닥을 형성하고 있다. 이 시편의 세정 목표는 내부에 있는 실크의 손상 없이 외부 은 표면의 오염층을 제거하는데 있다. 기존의 화학적, 기계적 방법으로는 실크의 손상으로 인해 처리가 쉽지 않은 경우이다. Fig. 17 (c)는 자외선 레이저빔(UV laser radiation)을 사용해 성공적으로 세정을 수행한 모습을 보여준다. 사진에서 보여지듯 내부의 연약한 실크의 손상 없이 외부 은 표면의 황화 오염물이 깨끗이 제거되었다.

금속 유물의 복원에 있어 표면 세정과 함께 중요한 공정은 세정 수행 후 탈염처리(desalting treatment)이다. 이는 유물이 가지고 있는 부식

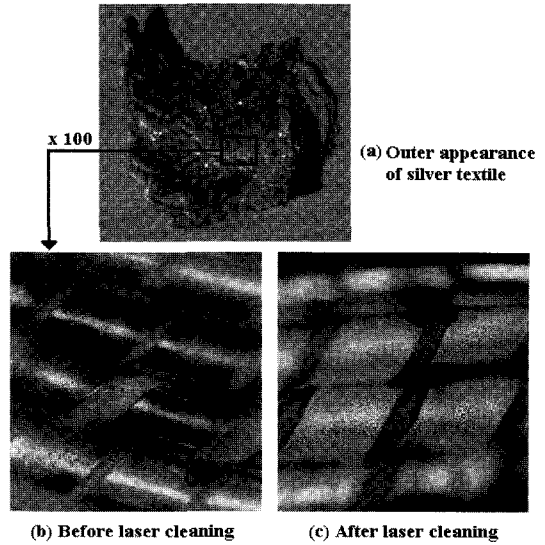


Fig. 17. Laser surface cleaning of 19C Silver Textile

인자인 염소 이온을 비롯한 모든 음이온을 제거하는 공정으로, 보통 알칼리 용액 속에 침적하여 부식이온을 용출 시키는데, 레이저 세정 후 표면 상태 및 제거할 이온에 따른 적절한 약품의 선택이 중요하다.

5. 결 론

지금까지 문화재 복원에 있어 레이저 세정 기술의 이해를 위해 레이저의 기본 원리 및 특성, 레이저 세정 기술의 발전 배경 및 기존 세정 방법과의 차이점, 그리고 본 기술을 이용한 대표적 응용사례 고찰을 통해 레이저 복원의 원리 및 특성을 살펴 보았다. 위에서 제시된 복원 사례 이외에 스테인드글라스, 상아, 양피지(parchment), 종이, 뼈 등의 표면 세정 성공 사례가 보고 되고 있으며, 현재 상당한 연구가 유럽을 중심으로 이루어지고 있다. 또한 LACONA(Lasers in the Conservation of Artworks)라는 국제 컨퍼런스가 격년으로 유럽에서 개최되고 있으며, 이 자리를 통해 레이저 세정 기술을 이용한 문화재 복원으로의 다양한 연구 성과를 공유하고 있다. 그러나 동양 문화권에서 레이저를 이용한 복원 사례 및 그 연구활동은 거의 전무한 실정으로, 향후

많은 노력과 상기 연구에 대한 정책적 배려가 이루어져야 한다고 본다. 특히 동양 문화재의 독특한 특성으로 인해 기존의 서양 문화재의 레이저 복원 공정과는 다른 기술적 개발 및 접근이 무엇보다 중요하며, 향후 도래할 문화경쟁 체제에서 우월한 위치 확보를 위해서도, 문화재 복원을 목적으로 한 레이저 세정 기술의 응용 및 연구 개발은 매우 중요한 학술적, 기술적 분야라 사료된다.

후 기

본 논문을 위해 Fig. 6, 7, 13, 16의 자료를 인용하는데 있어 도움을 주신 미국 UCSD의 Prof. J. F. Asmus, 영국 NMGGM의 Dr. M. Cooper 및 그리스 FORTH의 Prof. C. Fotakis 분들께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Schuocker, D., 1998, Handbook of the EuroLaser Academy (Chapman & Hall)
- Steen, W. M., 1991, Laser Materials Processing (Springer-Verlag)
- 김도훈, 1990, 레이저가공학 (경문사)
- Asmus, J. F., 1987, "Light for art conservation", *Interdisciplinary Science Reviews*, 12(2), pp 171-178
- Asmus, J. F., 1999, Laser restoration of the medieval sculpture of the Cremona cathedral, *Proceedings of ICALEO'99*, Section F, pp 11-20
- Lu, Y. F., Aoyagi, Y., Takai M. *et al.*, 1994, Laser surface cleaning in air: mechanisms and applications, *Japanese Journal of Applied Physics* 33, pp 7138-7143
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., 2000, Laser removal of oxides and particles from copper surfaces for microelectronic fabrication, *Optics Express* 7(2), pp 68-76
- Lee, J. M., Watkins, K. G., 2001, Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock wave, *Journal of Applied Physics* 89(11), pp 6496-6500
- Lee, J. M., 1999, In-process and intelligent monitoring systems for laser cleaning process, Ph.D. Thesis, Chap. 3, The University of Liverpool
- 이종명, 2001, 레이저 세정 기구, *월간레이저기술* (한국산업정보센터), 6월호, pp 34-41
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., 2000, Laser cleaning for electronic device fabrication, *The Industrial Laser User* 18, pp 29-30
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., 2000, Laser cleaning: Introduction and Applications, *한국레이저가공학회지* 3(1), pp 2-11
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., Steen, W. M., 2001, In-process chromatic monitoring in the laser cleaning of marble, *Journal of Laser Applications* 13(1), pp 19-25
- Cooper, M., 1997, Recent developments in laser cleaning, *The Building Conservation Directory*, pp 122-124
- Fotakis, C., 1995, Lasers for art's sake, *Optics & Photonics News*, pp 30-35
- Anglos, D., Couris, S., Mavromanolakis, A. *et al.*, 1995, Artwork diagnostics: Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Laser induced fluorescence (LIF) spectroscopy, *Proceedings of LACONA I*, pp 113-118
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., 2000, Chromatic modulation technique for in-line surface monitoring and diagnostic, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, pp S311-316
- Lee, J. M. and Watkins, K. G., 2000, Prediction system of surface damage, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, pp S303-309