채색 안료 층의 표면오염물에 대한 레이저클리닝기법의 적용성 평가 연구 -공초점레이저주사현미경(CLSM)을 통한 분석평가 중심으로-

김진형¹

국립문화재연구소 보존과학연구실

Study of Applicability for Removing Contaminants on Surface of Color Pigment Using the Laser Cleaning Technique -Focus on Analysis Method of Confocal Laser Scanning Microscope-

Jin-Hyoung Kim¹

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Deajeon, 305-380, Korea

¹Corresponding Author: celloly@naver.com, +82-42-860-9257

초 록 훼손된 문화재의 안정적인 보존 방안을 제안하는데 있어서 수많은 접근방법들이 있으며 이 방법들은 검증절차가 필수적이다. 또한 보존행위 이후의 예상되는 결과물들은 긍정적 결과로 도출되어야 하는 필연성을 가지고 있다. 보존행위는 문화재가 갖는 고유한 다양성, 특수성 등등의 여러 사항들을 고려한 명확한 해법을 찾는 행위는 당연히 쉽지 않은 과제이다. 또한 기존에 이미 검증된 방법론이나 접근법이라 하더라도 그 대상이 처한 상황이나 조건에 의해 원점에서 재고해야 되는 경우도 있다. 문화재보존행위에 대한 안정적 방법을 구현하기 위해서는 많은 시행착오가 불가피하다. 이러한 시점에서 레이저를 이용한 문화재의 적용은 이미 그 효율성에 대해서 일부가 검증되었음에도 불구하고 아직까지 재질별 적용 호환에 대한 검증이나 연구가 미비하다. 레이저빔의 특성상 모든 문화재 재질에 대한 적용은 한계가 있지만, 비접촉성 접근방법이라는 여타 클리닝방법과 다른 기본 원리이기 때문에 그 특성을 장점으로 활용하여 안정성을 확보하고자 하였다. 이러한 행위 과정은 공초점레이저주사현미경(CLSM)을 활용하여 채색안료와 레이저 광에 대한 작용반응 등의 일련의 과정을 관찰하였다. 레이저빔과 여러 종류의 채색안료들과의 반응과정에서 발생하는 문제점이나 클리닝기법으로써의 효율성을 동시에 실험하여 실제 문화재에 대한 적용 범위 선정이나 적용 이후의 결과물을 예측하는데 도움을 주고자 하였다.

중심어: 레이저클리닝, 채색안료, 공초점레이저주사현미경

ABSTRACT Considering that decision in conservation treatment for damaged objects should consider not only various options of methodology of intervention but also possible consequences of different types of intervention, it is a difficult task to decide and propose clear and safest solution of preserving an object. In addition, it should be constantly challenged by conservators even if it is proved technique or methodology in a past treatment. Therefore, there is no absolute solution which can be applied to all practice but each decision can be different case by case. It is not possible to estimate the

way how the present condition of material and environmental aspects would affect to the condition of an object in future. However if conservators keep trying to set out various ways of analysing pro and against effect of past treatments, it would be able to provide useful logics of proving efficiency and appropriateness of a certain treatment. Understanding that the advantage of laser technique is to adopt a way of cleaning an object without making a direct contact, which is different from other techniques, this paper aims at securing stability of laser techniques, although it remains a limitation in the compatibility to all other materials. This study has examined reacting process on the painted pigments against laser beam by using CLSM in order for it to display both the problems from such reacting process and the efficiency of it as a cleaning methodology. It has intended to estimate the result of laser techniques and propose the range of applicability.

Key Words: Sword, Sword with ring pommel, Microstructure, Seochon Bongseon-ri, weapon

1. 서 론

국내의 레이저클리닝 기술은 석조문화재의 표면에 발생된 흑색 오염물의 안정적인 제거를 위한 적용 사례가 있으며(Kim, 2006), 금속소재의 유물은 원형 유지를 위한 보존처리 연구 사례가 있다(Lee *et al.*, 2012). 하지만 레이저를 이용한 적용 사례가 국내에서는 보편화된 보존처리 방법이 아니기 때문에 많지 않다. 그리고 기존의 클리닝 연구에 대한 쟁점은 과연 보존행위 이후에 얼마나 안정적인 결과와 신뢰를 도출할 수 있는가에 대한 방안이나 장치를 모색하는 것이 주된 임무 일 것이고, 국외 기관들 또한 보존처리법의 선택에 있어서 그 장점과 함께 사후 조사, 과학적 연구, 처리, 기능의 모든 측면에서 부정적 영향을 끼칠 가능성을 고려하여야 한다고 규정하고 있고 있으며, 사용된 기법과 재료는 향후의 처리나 조사에 지장을 주지 않아야 한다고도 규정하고 있다(Lee, 2011). 이와 같이 모든 보존행위에 있어서는 그 행위의 논리적 정당성을 위한 기술적 검증방법의 연구가 필수적이다. 특히, 새로운 접근법이나 기초적 연구에서는 더할 나위 없이 중요하다.

본 실험에서는 기존 레이저클리닝의 단점인 유물 표면과의 과잉 접촉에 의해서 발생하는 유물 표면 훼손 문제점(Kim, 2010)을 보완 할 수 있는 개선 방안을 모색하는 것과 레이저클리닝의 특화된 장점을 강화하여 적용 대상물을 다양화하는 방안을 모색하는 것이다. 그 중 채색된 문화재에 대한 활용이나 적용성 연구를 위주로 하여 레이저광과 채색 안료와의 상관 반응을 해석하고, 이 과정에서 발생하는 여러 미시적 현상들을 관찰하여 레이저 클리닝 공정의 안정성 및 효율성에서 부합하는 방법론을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 시료 선정 및 적용방법

실험을 위한 안료는 색상차이에 따른 레이저광 반응 이후에 변화양상을 확인하기 쉬우면서도 일반적으로 많이 사용되는 화학안료들을 중심으로 선정하였다. 선정된 안료는 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 화학안료를 선정하였으며, 천연안료에 대한 레이저광 간의 관계 실험은 차후에

Figure 1. Six colors were painted on slide glass after etching for stable coloration(1-1. Left, 1-2. Right).

레이저 광의 특성인 광열적 효과(Photo-thermel effect)를 중점으로 연결 실험 예정이다.

본 실험에서는 시편을 3종류의 실험을 위해서 제작방법을 달리하였다. 단순히 각각의 색상소재와 레이저광 간의 반응 정도를 실험하기 위해 컬러 시트(Color control Patches Q13, Kodak, USA)를 사용하였다. 시트 색상은 9종, 진청, 청, 녹색, 각각의 색상에 레이저광을 방사하여 조건별로 반응도를 관찰하였다. 각각의 방사조건은 1064nm 파장에서 500mj와 900mj 출력으로 색상별로 방사하였다. 그리고 532nm의 300mj에서 색상별로 방사하였다. 출력조건 설정은 예비실험을 통해 전후비교가 가장 효율적인 범위를 선정한 것이다(Figure 1-1).

두 번째로 레이저광을 채색안료에 적용하였을 때에 손상 정도를 알아보기 위한 실험으로 적색, 갈색, 황색, 녹색, 회녹색, 청색 등 6종의 분말상의 안료들을 약 20,000psi 이상의 조건에 압축프레스(4451A Automatic Briquet Press, USA)로 지름 약 ϕ 40mm의 펠렛 형태로 압착시켜 제작하였으며, 이는 분산된 안료 분체를 응집시켜 레이저광과 안료 간의 반응 결과치를 효과적으로 관찰하기 위함이다(Figure 2).

마지막으로 색상과 레이저광 간에 반응도 실험에서는 슬라이드글라스 표면에 적색, 갈색, 황색, 녹색, 회녹색, 청색 등 6종의 안료를 아교에 희석시켜 도포하였다. 그리고 색상군의 안료 표면에 검은색을 다시 도포하여 흑색 층을 형성시켰는데, 이는 흑색 층이 레이저광에 반응한 이후에 색상 층과는 어떤 양상의 변화가 관찰되는지를 보기 위함이다. 또한 색상 군과 더불어 대조군으로 순수하게 흑색 먹물과 페인트만을 칠한 2개조를 제작하였다. 검은색을 선택한 이유는 레이저광에 대한 반응 효율성이 검증되었기 때문에 1차적으로 검은색에서 반응하는 양상을 비교하기 위함이다. 레이저광의 출력과 파장은 대조군에 방사한 조건과 동일한 범위에서 방사 횟수만 늘려 상태 변화를 관찰하였다(Figure 1-2).

2.2. 실험장비 및 분석방법

기존의 전자현미경이나 광학현미경을 이용한 관찰방법

은 높은 해상도와 미세구조를 볼 수 있는 장점이 있지만, 보존처리 전후에 발생하는 단차나 진행상태를 효율적으로 관찰하는데 있어서는 한계가 있다(Okoshi, 1980). 그래서 광학 및 전자현미경 기법의 장점과 더불어 입체적 형태로 재구성할 수 있는 공초점레이저주사현미경(CLSM)의 장점을 활용하였다. 공초점레이저주사현미경으로 시편을 관찰함에 따라 2차원영상과 함께 3차원으로 구성되어 레이저클리닝을 적용한 후에 미시적인 상태 변화나 변화 과정을 확인하고자 하였다.

레이저광 소스는 Nd-YAG(Neodymium-Yttrium Aluminum Garnet) 레이저를 이용하였으며, 레이저 기기는 Dual Wavelength Laser Cleaning System(LPCL Series/Laser & Physics co. Ltd, Korea)를 사용하였다. 사용된 출력파장은 1064nm와 532nm의 두 종류 파장을 적용하였으며, 출력에너지는 500mj@1064nm, 900mj@1064nm, 300mj@532nm의 3가지 출력으로 방사한 스팟의 횟수별로 각각 1회, 2회, 10회, 20회 4곳을 방사시켰다. 그리고 조건별로 적용한 이후에 관찰은 공초점레이저주사현미경(LSM700, Carl Zeiss Microscopy, Germany)을 이용하여 표면영상을 얻었다. 그리고 표면영상은 405nm 파장의 다이오드 레이저 소스로 10배 대물렌즈(10×@0.25HD DIC M27)로 1.50 μ m/80cut 단차로 3차원 영상으로 재구성하였다.

3. 연구결과

3.1. 색상과 레이저광의 반응도 실험결과

컬러 시트(Color Control Patches Q13, KODAK, USA)에 나열된 각각의 색상에 레이저광을 방사하여 반응도를 살펴보았다. 1064nm@500mj, 1064nm@900mj 조건으로 각각의 색상 면에 1회, 5회, 10회를 방사하였다(Table 1). 각 컬러시트의 상부의 명도가 낮은 색상 군에 레이저광을 방사한 경우에는 모든 방사 조건에 반응하지 않은 것으로 육안 관찰하였다. 그리고 1064nm@500mj를 적용한 컬러시트의 ‘Blue’, ‘Green’, ‘3@color(RGB)’, ‘Black’ 색상 부분에선 방사 횟수 별로 부분적인 차이를 보였지만 레이

Wavelength	Output energy	1 Time	2 Times	10 Times	20 Times
1064nm	500mj				
	900mj				
532nm	300mj				

Figure 2. Conditions for application methods of laser beam on six-colored samples.

저광에 대한 반응을 나타냈다. 그리고 ‘Cyan’의 경우에는 5회, 10회 방사에서만 반응을 나타냈고, 어두운 검은 계열의 ‘3/Color(RGB)’와 ‘Black’의 색상 부분에서는 모든 레이저광 조건에 원형의 레이저광 반응점을 나타내면서 확실한 반응이 관찰되었다. 500mj 출력으로 방사한 컬러시트들은 900mj 출력에서 방사된 레이저광 반응에 비해 반응 부분의 형태나 색상 제거 정도가 다소 약한 것이 관찰되었다. 그러나 검은색 계열의 컬러시트에서는 출력과 횟수에 상관없이 기존에 예측한 명확한 반응 결과를 재현하였다(Figure 3). 900mj 출력을 적용한 컬러시트 색상 군에서는 500mj 출력에 비해 반응 정도 차이에 의해 나타나는 반응 원형의 선명도 차이 이외에는 컬러 차이에 의해 나타나

는 특이점은 관찰되지 않았다(Figure 4). 그리고 파장 영역대가 다른 1064nm와 532nm의 비교 반응 결과는 효율적인 비교를 위해 동일 색상 면에 2곳에 레이저광을 방사하였다. 1064nm 파장의 경우 ‘Blue’, ‘Green’, ‘Cyan’과 무채색 ‘3/Color(RGB)’, ‘Black’에서 반응 결과를 나타낸 반면, 532nm 파장에서는 ‘White’와 ‘Yellow’를 제외한 모든 색상 면에서 레이저광과의 반응을 나타내는 특징이 관찰되었다(Figure 5). 결과적으로 색상의 종류나 명도 차이를 나열한 조건에서의 반응 실험에서와 같이 레이저광이 출력이나 횟수에 따라 단계적인 제어가 가능케 하는 결과를 도출하였으며, 레이저광과 색상 간의 상관 관계성을 일부 확인할 수 있었다.

Table 1. Results of color reactivity for shooting times using laser beam on the standard color sheet with condition (○Reaction, ×Not reaction).

nm/mj/Time	Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/color	Black
1064/500/1	○	×	○	×	×	×	×	○	○
1064/500/5	○	○	○	×	×	×	×	○	○
1064/500/10	○	○	○	×	×	×	×	○	○
1064/900/1	○	○	○	×	×	×	×	○	○
1064/900/5	○	○	○	×	×	×	×	○	○
1064/900/10	○	○	○	×	×	×	×	○	○
532/300/10	○	○	○	×	○	○	×	○	○

Figure 3. Results of color reactivity for shooting times(one, five, ten) using laser beam on the standard color sheet with condition(1064nm@500mj).

3.2. 레이저광에 대한 채색안료의 손상 한계 실험결과

준비된 분말 안료들을 압축 고형화 시킨 시편에 레이저광을 방사하였다. 각각의 채색 안료 시편에 레이저광의 방사횟수를 증가하면서 나타나는 현상을 관찰하였다. 안료 시편에 방사된 레이저광은 색상별로 약간의 다른 양상은 나타냈으나, 공통적으로 레이저광에 의한 반응 형태인 원 형태의 구멍을 생성시키면서 반응하는 것을 확인 할 수 있었다. 색상별 6개의 시편 중 황색 시편과 청색 시편은 1064nm@500mj@1Time 조건에서 제일 약한 반응을 보

였으며, 이 같은 반응 양상은 모든 색과 조건 중에 가장 낮은 반응 결과였다. 반면에 횡수와 출력을 높인 1064nm@900mj@20Times 조건까지 진행되는 동안 안료 표면에 원형의 깊은 구멍을 형성시키면서 레이저광과 높은 반응을 나타내 대조적인 결과의 특이한 양상이 관찰되었다. 이는 본 실험에서 배제되었던 안료구성 재질의 성분차이에 의해 나타난 현상이고 판단된다(Table 2).

레이저광에 반응한 원형의 반응한 부분에 경계면을 공초점주사현미경을 이용하여 각각 관찰하였다. 반응한 경계 면을 기점으로 X축과 Y축은 평면의 반응상태 축을 나

Table 2. Depth results by Laser beam.

	Red	Red ocher	Yellow	Green	Green Gray	Blue
Min. (1064/500/1T)	5.8 μ m	7.6 μ m	8.2 μ m	13.7 μ m	3.2 μ m	22.1 μ m
Max. (1064/900/20T)	148.0 μ m	156.0 μ m	391.0 μ m	236.0 μ m	74.0 μ m	319.0 μ m
Diff.	142.2 μ m	148.4 μ m	382.8 μ m	222.3 μ m	70.8 μ m	296.9 μ m

Figure 4. Results of color reactivity for shooting times(one, five, ten) using laser beam on the standard color sheet with condition(1064nm@900mj).

Figure 5. Results of color reactivity for shooting five times using laser beam on the standard color sheet with condition(1064nm@900mj and 532nm@300mj).

Figure 6. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted red pigment.

Figure 7. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted Red Ocher.

타낸 것이고, Z축은 레이저광 반응에 의해 생성된 원형 홈의 깊이의 단차를 나타낸 축이다.

시편들에 생성된 원형 홈에 각기 다른 깊이의 단차를 3차원 무지개로 단차를 색으로 표시하였다. 붉은색을 띄는 부분은 레이저광이 접촉하지 않은 시편의 표면이며, 푸른색을 띄는 부분은 레이저광과 반응하여 안료 층이 증발되어 생성된 원형 홈 부분이다. 푸른색 부분의 검은 부분은 측정 한계치를 넘어선 부분이며, 붉은색 부분의 흰색을 띄는 부분 또한 측정 한계치를 벗어난 부분이다.

세부적으로 각각의 시편을 살펴보면, 적색시편(Red)은 1회와 2회 레이저광을 방사한 구간의 시편 표면이 푸른색계열과 노란색계열로 혼재된 상태로 $5.8\mu\text{m}$ 에서 최대 $21.7\mu\text{m}$ 까지 비교적 낮은 단차를 나타내고 있는 것이 관찰되었다. 하지만 10회에서 20회 횟수가 높은 구간에서는 최저 $15\mu\text{m}$ 에서 최고 $148\mu\text{m}$ 의 검은색계열에 최저 바닥면과 최상부면인 흰색계열까지 광범위하게 색상 분포가 나타나고 있어서 깊은 단차를 확인할 수 있었다. 3차원 이미지에서 푸른색계열과 붉은색계열의 경계선이 명확해지도록 레이저광에 의한 높은 반응의 결과로써 원형의 홈이 가파르게 형성되어 Z축의 단차가 확연하게 나타나는 것이 관찰되고 있다(Figure 6).

갈색시편(Red Ocher)은 $7.6\mu\text{m}$ 에서 최고 $156\mu\text{m}$ 까지의 단차를 나타내고 있어서 적색 시편에 비해서는 레이저광

에 대한 반응도가 높은 것으로 관찰되었다. 전체적으로 푸른색계열과 붉은색계열의 경계선이 선명하게 나타나며 특히, $500\text{mj}@2\text{Times}$ 구간부터는 푸른색과 붉은색 사이의 중간색 층인 노란색 층이 거의 나타나지 않아서 명확하게 단차가 형성된 것이 관찰되고 있다(Figure 7).

황색시편(Yellow)은 레이저광의 반복횟수가 높을수록 단차의 편차가 큰 것이 특징으로 나타난다. 특히, $1064\text{nm}@500\text{mj}@10\text{Times}$ 구간부터는 각각 $110\mu\text{m}$ ($500\text{mj}@10\text{Times}$), $165\mu\text{m}$ ($900\text{mj}@10\text{Times}$), $390\mu\text{m}$ ($500\text{mj}@20\text{Times}$), $295\mu\text{m}$ ($900\text{mj}@20\text{Times}$)로 높은 수치를 나타내고 있다(Figure 8).

녹색시편(Green)의 경우, 푸른색계열과 노란색계열이 혼재된 부분이 많이 관찰되고 있으며, 반응에 의해 생성된 단차도 $500\text{mj}@1\text{Times}$ 구간부터 $500\text{mj}@20\text{Times}$ 구간까지가 각각 $13.7\mu\text{m}$, $13.5\mu\text{m}$, $21.4\mu\text{m}$ 로 비교적 낮은 단차가 관찰되었다. 900mj 출력에서도 1회 방사에 약 $18.0\mu\text{m}$, 2회 방사에 $26.3\mu\text{m}$ 로 낮은 단차를 나타내고 있어서 여타 다른 색 시편에 비해서 단차가 낮게 형성된 것이 관찰되었다. 하지만 방사횟수가 증가될수록 생성되는 단차가 각각 $135\mu\text{m}$ ($500\text{mj}@20\text{Times}$), $125\mu\text{m}$ ($900\text{mj}@10\text{Times}$), $236\mu\text{m}$ ($900\text{mj}@20\text{Times}$)로 역시 다른 색 시편들과 마찬가지로 단차의 수치가 비슷해지는 양상을 나타내는 것이 관찰되었다(Figure 9).

Figure 8. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted Yellow pigment.

Figure 9. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted Green pigment.

Figure 10. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted Greenish Gray pigment.

그리고 회녹색시편(Greenish Gray)을 보면, 500mj 출력에서 각각 횡수별 3.2 μ m, 10.4 μ m, 21.7 μ m, 58.2 μ m로 비교적 낮은 단차를 나타냈으며, 900mj 출력에서도 각각 15 μ m, 21 μ m, 25 μ m, 74 μ m로 관찰되어서 다른 색 시편에 레이저광에 대한 반응이 낮은 것으로 나타났다. 그리고 900mj에서 20회를 방사한 경우에도 다른 색 시편과 달리 반응도가 낮은 것이 관찰되었다. 이는 회녹색 시편에 대한 레이저광에 대한 반응도가 다른 색 보다 현저히 낮은 것으로 판단된다(Figure 10).

마지막으로 청색시편(Blue)은 전체적으로 레이저광에 대한 반응이 높은 것으로 관찰되었는데, 900mj@10Times, 20Times 구간에서는 각각 274 μ m, 319 μ m의 큰 수치가 단차가 생성되었음을 알 수 있었다. 하지만, 측정 한계치를 넘는 결과의 수치가 관찰되어 실제로는 더 큰 레이저광과의 반응이 있었음을 알 수 있어서 청색 안료에 대한 반응도는 매우 높은 것으로 판단되었다(Figure 11).

3.3. 채색 층과 흑색 층에 대한 레이저광의 반응도 실험결과

레이저광의 파장별, 출력별 반응 결과를 보았다. 슬라이드글라스 표면을 거칠게 애칭을 시켜 안료들의 안착률을 높은 준비된 각각의 색상별 시편에 레이저광의 반응을 효율적으로 관찰하기 위해 지시색인 검은색을 색상 시편들

의 상면에 각각 도포하였다. 그리고 레이저광을 준비된 시편 표면에 각각 4곳씩 방사하였다. 대조군으로써 안료를 도포하지 않고 검은색 먹물과 검은색 페인트만 도포한 순수검은색시편(Black)은 레이저광에 대한 반응 상태를 비교할 수 있었다. 전체적으로 레이저광 방사를 20회 적용한 시편 군에서는 대부분의 안료 색상 층이 사라지거나 표면 손상이 진행된 결과를 볼 수 있었다. 1064nm 파장에서 900mj 출력과 500mj 출력은 각각 약간의 차이는 있었지만 대체적으로 유사한 양상으로 볼 수 있었다.

전체적인 시편을 살펴보면, 1회 방사한 군에서는 색상 층이 그대로 있거나 미약한 반응을 나타냈지만, 방사횟수를 늘린 구간 중에서 2회부터 10회를 방사한 구간이 육안으로 판단하기에도 안료층 위에 덧칠한 검은색 층이 원 형태로 완전 제거가 되면서 색상 층이 선명하게 드러난 것을 확인할 수 있어서 효과적인 반응 구간이라 할 수 있다. 532nm 파장 영역에 대한 반응은 색상 종류 별로 반응의 정도차가 크지 않고 일정한 양상을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다(Table 3).

세부적으로 살펴보면, 레이저광에 대한 표준 반응과정을 관찰하기 위해서 제작된 검은색 시편(Black)들은 각각 스프레이페인트와 먹물로 제작된 시편이다. 그러나 두 개의 시편은 재질 차이와 관계없이 거의 유사한 반응을 나타내는 것을 확인할 수 있었다(Figure 12, 13).

Figure 11. 3D images of CLSM for laser applicability of the specimens made by compacted Blue pigment.

Table 3. Results of reaction by Laser beam(↓ Weak, ↑ Strong, ○ Proper, A=lacquer, B=Ink, C=Red, D=Red Ocher, E=Yellow, F=Green, G=Green Gray, H=Blue).

	1Time								2Times								10Times								20Times							
Color	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H
1064/ 500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	○	○	○	○	○	○	○	○	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
1064/ 900	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	○	○	○	○	○	○	○	○	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
532/ 300	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	○	○	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	○	○	○	○	↓

	1064nm @500mj	1064nm @900mj		1064nm @500mj	1064nm @900mj
Shot point			Yellow		
Black			Green		
Red			Greenish gray		
Red ocher			Blue		

Figure 12. Results of laser reactivity for the each specimens which colorant by black color.

	1 Time	2 Times	10 Times	20 Times
1064nm				
532nm				

Figure 13. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the controls(black, lacquer paint).

적색 시편(Red)의 결과를 보면 1064nm@500mj 의 조건에서는 2회와 10회의 방사 구간에서 순차적이고 안정적인 흑색의 선택 제거 과정이 발생되었음을 알 수 있었다. 1064nm@900mj 의 조건은 2회 방사에서 흑색 층이 원 형태를 나타내며 완전제거가 이루어졌으며, 10회에서 20회 구간에서는 과잉반응으로 인해 안료 층의 균열이 발생하는 것을 관찰하였다. 532nm@300mj 의 적용부분은 20회 구간에 이르러서 하부의 안료 층이 드러나는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 모든 색상 시편에서 유사하게 관찰되는 반응 양상이다(Figure 15).

갈색시편(Red Ocher)의 경우에는 유사 계열 색상의 적

색시편(Red)과 비슷한 반응을 나타냈다. 1064nm@900mj @10Times에서 가장 효율적인 반응이 나타났으며, 20회에서는 안료 층과 반응하면서 안료의 일부가 사라진 것을 관찰 할 수 있었다. 그리고 532nm 파장에서는 여타 색상에 상관없이 유사한 반응이 관찰되었다(Figure 16).

황색시편(Yellow)은 1064nm@500mj@10Times과 1064nm@900mj@2Times에서부터 효율적인 반응 양상을 나타내는 구간이며 이후 방사되는 레이저광은 안료 층에 영향을 준 것으로 판단된다. 특히 900mj 출력에서는 10회 방사 구간에서는 안료 층이 균열이 심화되면서 슬라이드 글라스 표면과 분리되는 현상이 관찰되었다. 20회 방사 구간에서

Figure 14. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the controls(black, ink).

Figure 15. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the controls on the red color.

는 완전히 안료 층이 분리가 된 것이 관찰되었다. 532nm 파장에서는 10회부터 20회 방사 구간사이에서 흑색 층이 제거가 되면서 안료 층이 나타난 것으로 판단된다. 이 또한 다른 시편과 유사한 양상으로 진행되었다(Figure 17).

녹색시편(Green)은 20회 구간에서 두 출력 모두 안료 층이 완전히 사라진 것을 관찰하였다. 특히, 1064nm@500mj에서 10회 구간과 20회 구간사이에서 검은색 층과 동시에 안료 층이 제거가 된 것이 특징적이다. 900mj 2회 구간부터 흑색 층이 제거가 되었고, 이후 방사되는 레이저

광은 안료 층에 영향을 주기 시작하여 안료 층의 탈락으로 진행된 것을 관찰할 수 있다. 532nm 파장에서는 특징적인 변화는 찾을 수 없었다(Figure 18).

회녹색시편(Greenish Gray)의 경우는 위의 녹색시편과 유사한 양상을 나타냈다. 단지 슬라이드글라스 표면에 도포되는 과정에서 각각의 안료 특성에 의해 착색이나 발림 정도차로 미세 균열이 발생된 것 예상된다. 그 외에는 레이저 광에 의한 흑색 층의 반응은 유사했다. 안정적인 제거 구간 또한 500mj에서는 10회 방사와 900mj에서는 2회 방사

Figure 16. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the red ochre color.

Figure 17. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the yellow color.

Figure 18. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the green color.

Figure 19. Results of laser differing laser energy, wavelength, count on the greenish gray color.

Figure 20. Results of applicability for energy, wavelength and times of laser on the blue color.

부터 나타났다. 532nm 출력도 녹색시편과 동일한 양상을 나타냈다(Figure 19).

청색시편(Blue)은 1064nm@500mj 에서는 2회부터 10 회 구간사이에 안정적 결과가 도출되었음을 알 수 있고, 1064nm@900mj@ 에서는 2회 구간부터 검은 지시색이 거의 제거가 된 이후에 안료 층과 반응을 하는 것을 관찰하였다(Figure 20).

4. 고 찰

본 실험을 통해 도출한 실험 결과는 다음과 같다.

첫째, 레이저광에 대한 색상 안료들의 반응 및 손상도 실험 결과는 레이저광에 각각의 색상마다 약간의 차이는 나타났지만, 레이저광의 방사횟수나 출력에 대한 상관관계를 설명할 수 있었고, 이를 통해 레이저광의 방사 횟수와 출력 조절에 따른 방법론적인 제어 가능성을 확보하였다.

둘째, 레이저광의 색상 종류에 따른 반응 실험에서는 색상 별로 각각의 반응 선호도를 확인할 수 있었는데, 대체적으로 밝은 계열의 색상 보다 어두운 계열의 색상에서 레이저광에 대한 반응도가 높다는 것을 확인할 수 있어서 기존의 레이저 클리닝 기법에 관한 연구결과에 추가적으로 유색 계열에 대한 반응 결과를 확인할 수 있었다.

마지막으로, 색상 안료 표면에 덧칠한 흑색 물질이 레이저광으로 인해 완전 제거가 이루어진 기준점을 확인 할 수 있었다. 이는 레이저광의 출력과 방사 횟수에 대한 안정적 반응 구간을 설정하는데 활용될 것이며, 나아가 레이저 클리닝의 적용성에 대한 매뉴얼 선정 및 활용에 기여될 것이라 사려 된다.

5. 결 론

레이저 클리닝 기법의 방법론을 전개 하는데 있어서 레이저광과 처리대상 간의 관계를 규명하는 것은 필수이라 할 수 있다. 일반적으로 어두운 계열의 오염물이나 흑색을 띠는 대상물에 대한 레이저광 반응은 기존의 논문이나 실험을 통해 검증되어 왔다. 그리고 안료와 같은 물질로 도포되어 있거나 유색으로 장식된 문화재 표면에 발생된 오염 물질에 대한 처리방법은 보편적이면서 안전한 방향으로 결과를 찾고자 노력을 하고 있다. 본 실험을 통해서 레이저광과 색상 안료 간의 상관관계가 관찰되는 조건이 순간적이고 미시적인 환경에서 발생되기 때문에 그 과정을 수치

화 및 시각화하였다. 결과적으로는 채색 안료들과 레이저광 간의 반응이 수많은 경우 수가 있어서 그 관계성을 명확하게 제시 할 수는 없었으나, 레이저 클리닝의 적용과정에서 색과 반응하는 메커니즘에 대한 이해와 안정성이 확보된 처리법인가에 대한 검증 방안으로써 공초점레이저주사현미경(CLSM)을 활용하였다. 이를 통해 레이저 클리닝 기법의 매뉴얼 제작과 활용 방법에 대한 지속적인 연구가 진행될 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소의 “문화유산 융복합연구(R&D)” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Kim, J.H., 2006, Report of conservation treatment for ten storied pagoda of geyongcheonsa II. National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 217-242. (in Korean)
- Kim, J.H., 2010, A Study of applicability of laser cleaning mechanism to stone heritage by testing and analysing of carbon removal modelling methodology, Korea. Ph.D. thesis, Gyeongju University, Gyeongju, 108. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.Y., Cho, N.C., Lee, J.M. and Yu, J.E., 2012, Experimental Study of Removing Surface Corrosion Products from Archaeological Iron Objects and Alternating Iron Corrosion Products by Nd:YAG Laser cleaning System. Korea J. Met. Meter., Vol.50, No.5, 353-360. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., 2011, Preliminary report for establishing ethical guidelines of conservation in Korea. ISBN 978-89-6325-764-8, National Research Institute of Cultural Heritage, Deajeon, 53, 85, 105. (in Korean with English abstract)
- Okoshi, T., 1980, Three-Dimensional Display. Proceedings of the IEEE, 68, 548-564. (in Japanese)
- Seo, M.H., Kim, J.B., 2009, Image Processing on the Metal Surface using the Confocal Microscope. Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, KSPE, June 03, 419-420. (in Korean with English abstract)