저출력 펄스 레이저를 이용한 도장면의 클리닝시 빔의 중첩에 따른 클리닝 특성에 관한 연구(Ⅱ) - 펄스 중첩률에 따른 클리닝부의 특성 분석 -

김지언* · 송무근** · 이종명*** · 현정훈**** · 김종도****,†

*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

**한국해양대학교 레이저응용기술지원센터

*** (주)아이엠티

****대우조선해양(주)

*****한국해양대학교 기관공학부

A Study on the Effect of Overlap Rate on Laser Beam Cleaning Characteristics while Cleaning Paint Using a Low Power Pulsed Laser(Ⅱ) - Analysis of Laser Cleaned Surface Characteristics for Various Pulse Overlap Rates -

Ji-Eon Kim*, Moo-Keun Song**, Jong-Myoung Lee***, Jeong-Hun Hyun**** and Jong-Do Kim*****,†

*Ocean Science and Technology School, Korea Maritime & Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

**Laser Advanced Machining Support Center, Korea Maritime & Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

***IMT Co., Ltd., Suwon, 16675, Korea

****Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Geoje, 53302, Korea

*****Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean Univ., Busan, 49112, Korea

†Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received August 4, 2019 ; Revised September 4, 2019 ; Accepted October 8, 2019)

Abstract

Laser cleaning technologies have been attracting attention as a solution to the environmental problems caused by pre-treatment processes, but there are very few studies on the removal of paint using laser cleaning. In this study, laser cleaning was performed on steel painted with shop primer and epoxy paint using a Q-switching fiber laser, and the characteristics of the laser cleaned surfaces was compared in relation to the pulse overlap rate, as a main parameter. Experimental results showed that the number of scans to remove the paint decreased as the pulse overlap rate increased. At pulse overlap rates of 20 % and 50 %, the oxide layer was not removed from the surface. However, when the pulse overlap rate was increased to 70%, the oxide layer was completely removed. In addition, damage of the base material was reduced when the pulse overlap rate was increased, more precise laser cleaning was possible.

Key Words : Laser cleaning, Q-switching fiber laser, Pulse overlap rate

1. 서 론

현재 조선해양 산업 현장에서 도장 전처리 작업은 동력공구 및 연마재 분사 방식을 채택하고 있으나 동력

공구에 의한 작업자의 위험성 및 연마재의 분진 비산에 의해 환경오염 문제가 지속적으로 야기되고 있는 실정이다. 또한 연마재의 재사용율이 낮아 유지 보수를 위한 추가 비용이 발생되고 있다¹⁻²⁾.

레이저 클리닝은 이러한 도장 처리 공정에서 환경오

염 문제에 대한 해결책으로 부상하고 있다³⁻⁵⁾. 레이저 클리닝 기술은 집속된 레이저 빔을 대상물질에 조사하여 모재의 손상 없이 오염물질을 선택적으로 제거하는 기술로써, 기존의 클리닝 기술과 비교하여 환경 친화적이고 우수한 제어성을 가진다. 따라서 국부적인 표면 처리가 가능하게 되어 도장면 제거 또는 전처리 작업 시간이 보다 단축된다.

Pandora Psyllaki 등은 레이저 클리닝 기술을 통하여 스테인리스강 표면의 산화층 제거를 위한 연구를 진행하였으며⁶⁾, Kearns 등은 구리표면의 산화층을 레이저를 이용하여 성공적으로 제거할 수 있었다⁷⁾. Tang 등은 컴프레서 임펠러 블레이드에 형성된 황화층의 레이저 클리닝에 관하여 연구하였다⁸⁾. 이와 같이 다양한 금속 재료 표면의 산화층 및 황화층의 제거를 위한 레이저 클리닝에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있으나, 도장면 제거에 관한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 레이저 클리닝을 통하여 숏프라이머(shop primer) 및 에폭시(epoxy) 도장면과 산화층을 제거하기 위한 실험을 진행하였다. 본 논문의 1 보에서는 산화층의 제거를 위하여 스캔 횟수 이외의 레이저 클리닝 매개변수의 제어가 필요함을 확인하였다. 본 논문의 2보에서는 여러 레이저 클리닝 매개변수 중 펄스 중첩률에 따른 도장면과 산화층의 제거 특성을 분석하였다.

2. 실험 재료 및 방법

실험 재료로는 선박에서 보편적으로 사용되는 숏프라이머와 에폭시 도료로 도장된 일반 구조용 강재(SS400)를 사용하였다. 강재의 표면에는 두께 약 11 μm 의 산화층이 존재하며, 도장면의 두께는 숏프라이머의 경우 15 μm , 에폭시의 경우 200 μm 이다.

실험에 사용된 레이저 장치는 저출력 레이저 클리닝 장비로 평균 출력(P_{ave}) 100 W의 Q-스위칭 파이버 레이저이다. 가우시안 분포를 가지는 레이저 빔은 2D 스캐너와 F-theta 렌즈를 거쳐 시험편의 1.5 cm $\times$ 1.5 cm의 영역에 조사되며 이때, F-theta 렌즈에 의해서 레이저가 조사되는 위치별로 초점 거리가 일정하게 제어된다. Fig. 1에 레이저 클리닝 장비의 구성을 나타낸다.

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 레이저 빔의 한 펄스와 다음 펄스 간 겹치는 비율을 펄스 중첩률(R_{po})로 정의하였다. 레이저 클리닝 실험에서 사용된 조건을 Table 1에 나타낸다. 클리닝은 에너지 밀도(D_e) 7.9 J/cm²의 조건에서 주된 매개 변수인 펄스 중첩률을 20 %, 50 %, 70 %로 변화시켰으며, 각각의 조건에서 스캔 횟수(N_s)를 일정한 간격으로 증가시키면서 진행하였다. 이

Fig. 1 The schematic of the laser cleaning experimental set up

Fig. 2 Schematic of experimental method by laser beam pulse overlap rate(R_{po})

Table 1 Experimental condition

Laser type		Q-switching fiber laser
Average power(P_a)		100 W
Energy density(D_e)		7.9 J/cm ²
Pulse duration(D_p)		100 ns
Peak power(P_p)		6 kW
Pulse energy(E_p)		0.6 mJ
Pulse frequency(f_p)		166.7 kHz
Scan speed	$R_{\text{po}} : 20 \%$	13.1 m/s
	$R_{\text{po}} : 50 \%$	8.2 m/s
	$R_{\text{po}} : 70 \%$	4.9 m/s
Pass overlap rate(R_{pao})		0 %

때 펄스 중첩률만의 영향을 파악하기 위하여 레이저 빔의 한 패스와 다음 패스 간에는 중첩이 없도록 하였다.

펄스 중첩률에 따른 레이저 클리닝을 실시한 후 각 조건별로 클리닝부의 표면과 단면을 관찰하여 펄스 중첩률에 따른 클리닝부의 특성을 분석하였다. 또한 도장면과 산화층의 제거 조건을 파악하기 위하여 클리닝부의 표면에 XRD 성분 분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레이저 클리닝부의 표면 및 단면 분석

3.1.1 슈퍼라이머 도장면 클리닝 특성

Fig. 3은 슈퍼라이머 도장면에 대하여 펄스 중첩률과 스캔 횟수에 따른 레이저 클리닝부 표면 확대 사진, 단면 SEM 이미지 및 조도 측정 값을 나타낸다.

레이저 클리닝된 표면을 살펴보면, 적은 스캔 횟수에서는 모든 시험편의 표면에 레이저 조사 흔적을 거의 볼 수 없지만, 스캔 횟수가 증가할수록 도장면이 제거되면서 레이저 에너지와 모재가 반응하여 레이저 펄스 간의 흔적이 뚜렷해지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 펄

스 중첩률이 (a) 20 %, (b) 50 % 및 (c) 70 %로 증가할수록 빔의 중첩이 확연해지는 것을 볼 수 있다. 다만 중앙의 에너지 밀도가 높은 가우시안 분포의 레이저빔에 의해서 빔의 가장자리는 밀도가 낮기 때문에 20 %의 펄스 중첩률에서는 클리닝 가공시 거의 영향을 미치지 못한다는 것을 확인하였다. 그로 인해 가우시안 분포를 가지는 레이저 빔을 사용하여 클리닝을 진행할 경우 20 % 이상의 중첩이 필요함을 알 수 있다.

레이저 클리닝된 시험편의 단면을 관찰하면, 20 %와 50 %의 펄스 중첩률에서는 스캔 횟수가 증가할수록 표면에 존재하는 도장면 및 산화층의 두께가 감소하다가 산화층으로 추정되는 표면층이 다시 증가한 것을 볼 수 있다. 특히 펄스 중첩률 20 %일 때 스캔 횟수 14회 그

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 20 \%$						
N_s	un-cleaned	1	8	11	14	17
Micro graphy
Cross-section	$R_z = 32.3\mu\text{m}$	$R_z = 24.3\mu\text{m}$	$R_z = 24.6\mu\text{m}$	$R_z = 24.4\mu\text{m}$	$R_z = 31.5\mu\text{m}$	$R_z = 35.6\mu\text{m}$

(a) $R_{po} : 20 \%$

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 50 \%$						
N_s	un-cleaned	1	3	6	9	12
Micro graphy
Cross-section	$R_z = 32.3\mu\text{m}$	$R_z = 21.8\mu\text{m}$	$R_z = 26.2\mu\text{m}$	$R_z = 24.5\mu\text{m}$	$R_z = 26.1\mu\text{m}$	$R_z = 26.6\mu\text{m}$

(b) $R_{po} : 50 \%$

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 70 \%$						
N_s	un-cleaned	1	3	6	9	12
Micro graphy
Cross-section	$R_z = 32.3\mu\text{m}$	$R_z = 23.2\mu\text{m}$	$R_z = 26.9\mu\text{m}$	$R_z = 21.5\mu\text{m}$	$R_z = 23.9\mu\text{m}$	$R_z = 25.4\mu\text{m}$

(c) $R_{po} : 70 \%$

Fig. 3 Micrography, cross-section and roughness of laser cleaned shop primer surface

리고 펄스 중첩률 50 %일 때 스캔 횟수 9회에서는 표면층이 다시 두꺼워지면서 표면 조도 또한 증가하고 있다.

하지만 펄스 중첩률이 70 %일 경우에는 스캔 횟수가 증가할수록 표면의 도장면 및 산화층의 두께가 감소하여 스캔 횟수 9회 이상에서 표면 조도는 다소 증가하였지만 표면층이 거의 제거된 것을 확인할 수 있다.

3.1.2 에폭시 도장면 클리닝 특성

Fig. 4는 에폭시 도장면의 펄스 중첩률과 스캔 횟수에 따른 레이저 클리닝부 표면 확대 사진, 단면 SEM 이미지 및 조도 측정 결과를 나타낸다.

에폭시 도장면의 레이저 클리닝된 표면 및 단면을 살펴보면 앞선 숏프라이머 도장면의 클리닝 특성과 거의

유사한 경향을 나타내고 있다. 다만 에폭시 도장 시험편은 도장면과 산화층의 경계가 뚜렷하여 도장면 제거 조건이 단면에서 확인 가능하였다. 펄스 중첩률 (a) 20 %에서는 스캔 횟수 25회, 펄스 중첩률 (b) 50 %에서는 11회 그리고 펄스 중첩률 (c) 70 %에서 스캔 횟수 7회에 에폭시 도장면이 거의 제거된 것을 볼 수 있다. 또한 이 조건에서 표면 조도가 가장 낮은 값을 나타내었다.

하지만 펄스 중첩률 20 %와 50 %의 조건에서는 도장면 제거 조건 이상의 스캔 횟수에서 산화층이 제거되지 않았으며, 표면 조도 값도 증가하였다. 70 %의 펄스 중첩률에서만 13회의 스캔 횟수 이상에서 산화층까지 제거되는 조건을 나타내었다.

이상의 숏프라이머 및 에폭시 도장면의 표면 및 단면

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 20 \%$					
N_s	un-cleaned	15	25	35	45
Micro graphy
Cross-section

(a) $R_{po} : 20 \%$

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 50 \%$						
N_s	un-cleaned	11	14	17	20	23
Micro graphy
Cross-section

(b) $R_{po} : 50 \%$

$P_{ave} : 100 \text{ W}, D_e : 7.9 \text{ J/cm}^2, R_{po} : 70 \%$						
N_s	un-cleaned	4	7	10	13	16
Micro graphy
Cross-section

(c) $R_{po} : 70 \%$

Fig. 4 Micrography, cross-section and roughness of laser cleaned epoxy surface

분석 결과를 토대로, 7.9 J/cm^2 의 레이저 에너지 밀도에서는 펄스 중첩률이 20 % 및 50 %에서는 스캔 횟수가 증가하여도 산화층과 같은 표면층이 잔류한다는 것을 알 수 있었다. 또한 펄스 중첩률이 증가할수록 표면층이 제거되는 스캔 횟수가 감소하고 표면의 조도가 완만해진다는 것을 확인하였다.

3.2 레이저 클리닝부의 XRD 성분분석

앞선 레이저 클리닝부의 단면 사진에서 표면에 잔류하는 성분이 도장면인지 아니면 도장면이 제거된 후의 산화층인지 확실하게 구분하기 위하여 표면 XRD 성분 분석을 실시하였다.

3.2.1 슈퍼라이머 도장면 분석 결과

Fig. 5에 펄스 중첩률 및 스캔 횟수에 따른 슈퍼라이머 시험편의 레이저 클리닝부 XRD 성분분석 결과를 나타낸다. 레이저 클리닝 전 슈퍼라이머 도료의 성분으로 파이로필라이트(pyrophyllite), 아연(zinc) 및 자철석(magnetite)이 검출되었다. 펄스 중첩률이 (a) 20 %일 때, 스캔 횟수 1회에서 도료의 성분인 아연이 검출되었으며 8회 이상의 스캔 횟수에서 도료의 성분이 완전히 제거되어 도장면 아래의 산화층 성분인 사삼산화철(Fe_3O_4)이 검출되었다. 펄스 중첩률 (b) 50 % 조건에서는 스캔 횟수 3회에 슈퍼라이머 도장면이 완전히 제거되었으나 산화층은 스캔 횟수의 증가에도 제거되지 않았다. (c) 70 %의 펄스 중첩률에서는 스캔 횟수 1회 만에 도료의 성분이 완전히 제거되었으며 산화층은 스캔 횟수 9회에 제거된 것을 확인할 수 있다.

즉, 슈퍼라이머 도장면의 경우에는 $15 \mu\text{m}$ 의 얇은 도장면으로 인해 펄스 중첩률 20 % 및 50 % 조건에서는 각각 8회 및 3회 이상의 스캔 횟수에서 도장면이 완전히 제거되어 산화층만 존재하며, 단면에서 확인되는 표면층은 산화층이라는 것을 알 수 있다. 또한 70 %의 펄스 중첩률 조건에서는 단 1회만에 도장면이 제거되고 9회에서 산화층도 제거되었다.

3.2.2 에폭시 도장면 분석 결과

Fig. 6에 펄스 중첩률에 따른 에폭시 시험편의 레이저 클리닝부 XRD 성분분석 결과를 나타낸다. 에폭시 도료의 성분으로는 파이로필라이트(pyrophyllite), 중정석(barite) 및 마그네사이트(magnesite)가 검출되었다. 에폭시 도장면은 각 펄스 중첩률 (a) 20 %, (b) 50 %, (c) 70 %에서 스캔 횟수 25회, 14회, 7회에서 제거된 것을 알 수 있다. 슈퍼라이머 시험편의 결과와 마찬가지로 에폭시 시험편 역시 펄스 중첩률 20 %, 50 % 조건에

Fig. 5 XRD result of laser cleaned shop-primer surface

서는 산화층이 제거되지 않았으나 펄스 중첩률 70 %, 스캔 횟수 13회의 조건에서 산화층이 제거되는 것을 알 수 있었다.

펄스 중첩률에 따른 도장면 및 산화층의 제거 조건을 살펴본 결과, 펄스 중첩률이 증가함에 따라서 도장면 제거를 위한 스캔 횟수가 감소하였다. 또한 펄스 중첩률 70 % 조건에서는 산화층의 제거가 가능하였으나 상대적으로 낮은 펄스 중첩률 조건에서는 산화층이 완전히

Fig. 6 XRD result of laser cleaned epoxy surface

제거되지 않았다. 이러한 현상은 열적 가공(thermal process)의 메커니즘을 가지는 레이저 클리닝시 낮은 펄스 중첩률 조건에서는 산화층이 제거되기 위한 임계값 이상의 레이저 에너지가 시험편에 조사되지 않은 것으로 판단된다.

펄스 중첩률에 따라 단위 면적당 시험편에 조사되는 레이저 에너지 양은 NOP(Number Of Pulses in a spot)을 통해서 비교할 수 있다. 이는 식(1)을 통해서 계산된다.

$$NOP = \frac{d}{v} f \quad (1)$$

v 는 스캔속도(mm/s), d 는 빔 직경(mm), f 는 펄스 주파수(Hz)이다. NOP는 동일한 단위면적 즉, 레이저 빔의 한 스폿에 조사되는 펄스의 수로 정의된다. 각 중첩률에 대하여 NOP를 계산한 결과 펄스 중첩률이 20%일 경우 한 스폿에 조사되는 펄스의 수는 1회이며, 50%일 경우 2회, 70%에서는 3회가 된다. 이를 통해서 동일한 레이저 에너지 밀도의 조건에서 펄스 중첩률의 변화에 의해 시험편에 조사되는 레이저 에너지의 양이 달라진다는 것을 확인하였다. 따라서 펄스 중첩률이 증가할수록 동일한 단위면적에 조사되는 레이저 에너지의 양이 증가하여 도장면과 산화층의 제거가 더욱 용이해진 것으로 판단된다.

4. 결 론

슈프라이머 및 에폭시 도장면과 산화층의 레이저 클리닝시 펄스 중첩률에 따른 레이저 클리닝부의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 펄스 중첩률이 증가함에 따라서 도장면과 산화층의 제거를 위한 스캔 횟수가 감소하였으며 클리닝부 표면조도 또한 완만해지는 것을 확인하였다.

2) 펄스 중첩률이 20%와 50%의 조건에서는 스캔 횟수가 증가하면 도장면은 제거되었지만 산화층은 잔류하였다. 하지만 70%의 펄스 중첩률 조건에서는 재료의 입열량이 증가함에 따라서 도장면과 산화층 모두 제거되었다.

3) 표면 XRD 분석을 통해 도장면과 산화층의 제거 조건을 명확하게 구분할 수 있었으며, 펄스 중첩률의 증가는 동일한 단위면적에 조사되는 레이저 에너지의 양을 증가시키기 때문에 펄스 중첩률 70% 조건에서 도장면과 산화층의 제거 효과가 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

ORCID: Ji-Eon Kim: <http://orcid.org/0000-0003-0445-5638>

ORCID: Moo-Keun Song: <http://orcid.org/0000-0001-6799-1302>

ORCID: Jong-Myoung Lee: <http://orcid.org/0000-0001-8638-5826>

ORCID: Jeong-Hun Hyun: <http://orcid.org/0000-0002-2643-8284>

ORCID: Jong-Do Kim: <http://orcid.org/0000-0002-2125-0426>

References

1. I. C. Park, M. S. Han, and S. J. Kim, Optimization of Painting Process to Improve Durability of Mega Yacht and Cavitation Erosion Characteristics, *J. Weld. Join.* 37(3) (2019) 254-261.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.3.9>

2. J. H. Bae, J. W. Kim, I. D. Choi, D. G. Nam, J. K. Kim and Y. D. Park, A Study on Tensile Shear Characteristics of Dissimilar Joining Between Pre-coated Automotive Metal Sheets and Galvanized Steels with the Self-Piercing Rivet and Hybrid Joining, *J. Weld. Join.* 34 (1) (2016) 59-67.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.59>
3. Q. Wang, Y. Guan, B. Cong, and B. Qi, Laser Cleaning of Commercial Al Alloy Surface for Tungsten Inert Gas Welding, *J. Laser Appl.* 28 (2) (2016) 69-81.
<https://doi.org/10.2351/1.4943909>
4. R. E. Litchfield, G. W. Critchlow, and S. Wilson, Surface Cleaning Technologies for the Removal of Crosslinked Epoxide Resin, *Int. J. Adhes. Adhes* 26 (2006) 295-303.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.05.001>
5. F. D. Zhang, H. Liu, C. Suebka, Y. X. Liu, Z. Liu, W. Guo, Y. M. Cheng, S. L. Zhang, and L. Li, Corrosion Behaviour of Laser-Cleaned AA7024 Aluminium Alloy, *App. Surf. Sci.* 435 (2018) 452-461.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.141>
6. Psyllaki, Pandora and Roland Oltra, Preliminary Study on the Laser Cleaning of Stainless Steels after High Temperature Oxidation, *Mater. Sci. Eng. A.* 282 (2000) 145-152.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00759-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00759-5)
7. A. Kearns, C. Fischer, K. G. Watkins, M. Glasmacher, H. Kheyranidish, A. Brown, W. M. Steen, and P. Beahan, Laser Removal of Oxides from a Copper Substrate Using Q-Switched Nd:YAG Radiation at 1064 Nm, 532 Nm and 266 Nm, *Appl. Surf. Sci.* 127-129(1998) 773-780.
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)00741-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00741-1)
8. Q. H. Tang, D. Zhou, Y. L. Wang, and G. F. Liu, Laser Cleaning of Sulfide Scale on Compressor Impeller Blade, *Appl. Surf. Sci.* 355 (2015) 334-340.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.128>