저출력 펄스 레이저를 이용한 도장면의 클리닝시 빔의 중첩에 따른 클리닝 특성에 관한 연구(I) - 스캔 횟수에 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(I) - Analysis of Laser Cleaned Surface Characteristics Based on Number of Scans -

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 October 8, 2019 ; Accepted October 14, 2019)

Abstract

In the shipbuilding and marine fields, the pre-treatment of painted surfaces for cleaning creates environmental pollution problems. Laser cleaning is an eco-friendly surface pre-treatment process which selectively removing contaminants on a surface by vaporizing them with a laser beam. In this study, a pulse laser was employed to laser clean shop primer and epoxy painted steel plates. The evaporation characteristics of the two paints and the laser cleaning characteristics were analyzed according to the number of laser scans. It was determined that the removal of epoxy paint, which has a relatively low evaporation point, was higher than that of the shop primer paint. In addition, to remove the coating surface and oxide layer while minimizing damage to the base metal, it is important to select the laser cleaning parameters including the number of laser scans.

Key Words : Laser cleaning, Pulse laser, Shop primer, Epoxy, The number of laser scans

1. 서 론

최근 미세먼지 등 환경문제에 대한 위기의식이 고조됨에 따라서 다양한 산업분야에서 환경오염 저감을 위

한 노력을 행하고 있다¹⁾. 이에 조선해양 분야에서는 환경오염을 야기하는 기존의 도장 전처리 방법을 대체하기 위하여 고효율, 고품질, 고정밀의 레이저 클리닝 기술을 이용한 환경 친화적인 표면 전처리 기술에 관심을 가지고 있다²⁻⁵⁾. 레이저 클리닝은 오염물질의 증발(vapori-

zation)에 의한 제거의 메커니즘을 가지며 레이저 어블레이션(laser ablation)에 기반한다. 레이저 어블레이션을 통한 오염물질의 제거는 크게 양자 가공(quantum process)과 열적 가공(thermal process)으로 분류되는데, 금속재료의 레이저 클리닝은 양자 가공과 열적 가공의 성질을 모두 포함하는 프로세스이다. 레이저 클리닝시 양자 가공은 레이저 광자의 높은 에너지가 오염물질의 화학결합을 파괴하여 오염 입자를 제거하는 가공이며, 열적 가공은 대상 물질에 조사되는 레이저 빔의 에너지량이 증가할수록 재료의 일부가 선택적 증발에 의해 제거되는 것이다^{6,7)}. 따라서 오염물질 및 모재의 증발점(boiling point), 열전도율(thermal conductivity)과 같은 기계적 물성은 레이저 클리닝의 결과에 큰 영향을 미친다. 또한 레이저 클리닝 가공에는 연속 레이저와 펄스(pulse) 레이저를 사용할 수 있으나, 오염물질을 선택적으로 제거하고 모재에 열적 영향을 최소화시키기 위해서는 짧은 레이저 조사 시간에 순간적으로 높은 에너지를 낼 수 있는 펄스 레이저를 사용해야 한다^{8,9)}.

따라서 본 연구에서는 Q-스위칭 발진하는 펄스 레이저를 사용하여 주된 매개변수인 레이저 스캔 횟수를 변화시키면서 숏프라이머(shop primer) 및 에폭시(epoxy) 도장 강판에 레이저 클리닝을 실시하고 레이저 클리닝 특성을 비교 및 검토하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 실험에 사용된 시험편은 숏프라이머 및 에폭시 페인트로 도장된 일반 구조용 강재(SS400)이며 도장면과 강재 사이에는 약 $11\mu\text{m}$ 두께의 얇은 산화층이 존재한다. Fig. 1에 레이저 클리닝 처리 되지 않은 도장 강판의 단면을 나타낸다. 숏프라이머와 에폭시 도장면의 두께는 각각 $15\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ 로, 선박에서 범용적으로 적용되는 것과 가장 유사한 시험편으로 제작하였다. Table 1에 도장 강판 표면의 XRF(X-Ray Fluorescence) 분석결과를 나타낸다. 숏프라이머는 주요 성분으로 Si, Mg, Zn 등이 검출되었으며, 에폭시의 경우 Si, Mg, Al의 원소 함량이 높게 나타났다. 도료를 구성하고 있는 Si, Mg, Al, Zn 등과 같은 원소들은 희생양극으로서 작용하게 되어 도장 피막 아래 금속의 부식을 방지

Fig. 1 SEM images on the cross section of un-cleaned surface

Fig. 2 Schematic of the laser cleaning experiment

또는 감소시키는 역할을 한다.

실험에 사용된 레이저 클리닝 장비는 평균출력(P_{ave}) 100 W의 펄스 파이버 레이저이다. 레이저는 100 ns의 매우 짧은 펄스 조사 시간과 6 kW의 높은 피크 출력(P_p)으로 발진한다.

Fig. 2의 레이저 클리닝 실험 모식도와 같이 파이버를 통해 전송된 직경 $98\mu\text{m}$ 의 레이저 빔은 고정된 시험편의 $1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm}$ 의 범위를 스캔한다. 레이저 에너지 밀도는 $7.9\text{J}/\text{cm}^2$ 으로 고정하였으며, 주된 매개변수인 스캔 횟수(N_s)를 일정한 간격으로 변화시켰다. 본 논문의 1보에서는 도장면만의 제거특성을 파악하기 위하여 레이저 빔의 중첩률을 레이저 조사 방향에 대하여 빔 직경의 20%로 하였다.

레이저 클리닝 전·후 시험편의 단면 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지를 통해서 스캔 횟수에 따른 도장면의 두께 변화를 관찰하였다. 또한 레이저 클

Table 1 XRF analysis result of painted steel

Element(wt%) Material	Si	Mg	Al	Ca	Zn	P	Mn	Ba	S	Cl	Fe
Shop primer	12.9	7.6	0.6	0.7	13.6	3.5	0.3	-	-	-	60.4
Epoxy	23.1	19.1	11.3	0.9	-	-	-	11.1	1.3	0.7	32.0

리닝부의 표면 조도 변화를 3D 현미경과 표면 조도 측정기로 분석하였다. 추가적으로 클리닝부 표면에 EDS (Energy Dispersive Spectrometer) 점 분석을 실시하여 도장면과 산화층의 잔류 여부를 확인하였다

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 도료의 증발 특성 비교

15 μm 두께의 숏프라이머 및 200 μm 두께의 에폭시 페인트로 도장된 시험편에 대하여 육안상으로 도장면이 완전히 제거되는 시점까지 스캔 횟수를 증가시키면서 레이저 클리닝을 진행하였다. 숏프라이머의 경우 스캔 횟수를 1회 및 9회 ~ 18회까지 3회 간격으로 변화시켰으며, 에폭시 시험편의 경우는 12회 ~ 24회까지 3회 간격으로 스캔 횟수를 변화시켰다. Fig. 3은 스캔 횟수에 따른 레이저 클리닝부의 표면 및 단면 SEM 이미지를 나타낸다.

숏프라이머로 도장된 시험편을 살펴보면, 스캔 횟수가 1회일 때 표면과 단면 이미지에서 볼 수 있듯이 회색의 숏프라이머 도장면이 대부분 잔류하는 것을 확인할 수 있다. 스캔 횟수 9회 및 12회의 조건에서는 숏프라이머 도장면이 육안상으로 잔류된 것처럼 보이지만 단면을 살펴본 결과 도장면은 모두 제거되고 산화층만이 관찰되었다. 스캔 횟수가 15회 이상이 되면 표면의 청결도가 더욱 증가하였지만, 표면의 산화층은 여전히 존재하였다.

이러한 경향은 에폭시로 도장된 시험편에서도 확인할

Table 2 Main components and properties of paint

Property Material	Main component	Melting point(°C)	Boiling point(°C)
Shop primer	zinc dust	149.5	907
Epoxy	bisphenol epoxy A	158	220

수 있다. 에폭시 도장면은 스캔 횟수 12회 및 15회의 조건에서 잔류하였으며, 스캔 횟수 18회 이상의 조건에서 에폭시 도장면이 완전히 제거되었지만, 산화층은 스캔 횟수가 증가하여도 여전히 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

도료별 레이저 1회 스캔시의 제거량을 계산해본 결과, 숏프라이머는 1회당 1.7 μm , 그리고 에폭시는 11.1 μm 가 제거됨을 확인할 수 있었다. Table 2의 도료별 주 성분과 물성을 통해 숏프라이머 도료의 주성분인 아연 분말(zinc dust)의 증발점이 에폭시 도료의 주성분인 에폭시 수지(bisphenol epoxy A)의 증발점에 비해서 약 4배 높은 것을 알 수 있다. 따라서 열적 가공을 수반하는 레이저 클리닝 메커니즘에 의해서 동일한 레이저 에너지가 조사되었을 때 증발점이 보다 낮은 에폭시 도장면의 제거량이 숏프라이머 도장면의 제거량 보다 많은 것으로 사료된다.

3.2 표면 조도의 변화

스캔 횟수에 따른 레이저 클리닝부의 거칠기 변화를 관찰하기 위하여 3D 현미경과 표면 조도 측정기로 클리닝부 표면을 분석하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 숏프라이머

Fig. 3 Surface and cross section of laser cleaned surfaces

이며 및 에폭시 도장 강판의 표면 3D 형상 및 조도측정 결과를 나타낸다.

Fig. 4 (a)의 레이저 클리닝전 숏프라이머 도장면의 3D 형상을 살펴보면, 도장면의 표면이 불균일한 것을 관찰할 수 있으며 레이저 1회 스캔시 불균일한 도장면이 일부 제거되면서 표면의 거칠기가 다소 완만해졌다. 레이저 클리닝부 표면에는 펄스 레이저의 조사에 의해서 레이저 빔에 따른 굴곡이 형성되며, 이러한 표면의 굴곡은 스캔 횟수가 증가함에 따라서 더욱 심화되는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 Fig. 4 (b)와 같이 레이저 스캔 횟수가 증가할수록 표면의 조도 값이 증가하였다. 레이저 클리닝이 진행되기 전의 시험편 표면은 조도 값이 $32.3\mu\text{m}$ 였다. 레이저 클리닝을 1회 실시하면 표면의 불균일한 도장면이 제거됨에 따라서 조도 값이 $22.4\mu\text{m}$ 로 낮아졌지만, 스캔 횟수가 증가하게 되면 표면 조도 값이 점차적으로 증가하여 스캔 횟수 18회의 조건에서

조도 값이 가장 높은 $36.8\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

하지만 에폭시의 레이저 클리닝된 표면은 숏프라이머 도장면과 다소 다른 경향을 나타내었다. Fig. 5 (a)의 에폭시 도장 강판의 표면 3D 형상을 살펴보면, 레이저 클리닝전 에폭시 도장면이 평평한 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 에폭시 도장면에 레이저가 조사되면 레이저 어블레이션에 의한 도료의 증발이 발생하여 도장면 표면의 불균일성이 증가한다. 따라서 레이저 클리닝 전과 비교하여 도장면이 잔류하는 조건인 스캔 횟수 12회에서 표면이 거칠어진 것을 확인할 수 있다. 스캔 횟수 18회의 조건에서는 도장면이 완전히 제거됨에 따라서 모재의 평평한 표면이 드러나 표면이 완만해지는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 스캔 횟수가 24회 까지 증가하면 레이저에 의해 표면에 굴곡이 형성된 것을 볼 수 있다. 이러한 표면 굴곡의 변화는 Fig. 5 (b)의 스캔 횟수에 따른 표면 조도 값을 통해 확연히 구분할 수 있

(a) 3D profile

(b) Roughness variation

Fig. 4 Roughness analysis result of laser cleaned shop primer surface

(a) 3D profile

(b) Roughness variation

Fig. 5 Roughness analysis result of laser cleaned epoxy surface

다. 그래프의 변화를 살펴보면, 3.8 μm 의 레이저 클리닝 전 표면 조도 값이 스캔 횟수 12회에서는 26.2 μm 로 상승하였다. 도장면이 완전히 제거되는 조건인 스캔 횟수 18회에서는 6.4 μm 로 조도 값이 다시 낮아 졌지만, 그 이상의 스캔 횟수에서는 표면 조도 값이 점차 증가하는 경향을 나타낸다.

결과적으로, 모재의 조도 값과 레이저 클리닝 전 표면의 조도 값이 높은 습프라이머 도장면은 레이저 클리닝에 의해 표면 조도가 낮아진 후 스캔 횟수가 증가함에 따라서 도장면이 제거되어 모재 자체의 조도 값까지 상승하였으며, 레이저가 더 조사되면 모재의 손상으로 인해서 조도 값이 더욱 상승하였다. 반면 모재 및 레이저 클리닝 전 표면의 조도 값이 낮은 에폭시의 경우에는 레이저 조사에 의해 조도 값이 상승한 후 스캔 횟수의 증가에 따라서 도장면이 제거되면서 표면 조도가 완만해졌다. 하지만 레이저 클리닝이 계속 진행되면 습프라이머 도장면과 같이 모재의 손상에 의해 표면 조도 값이 증가하였다. 따라서 도장면의 레이저 클리닝시 과도한 레이저 조사는 모재의 손상을 야기할 수 있기 때문에 적절한 스캔 횟수의 선정이 중요하다.

3.3 레이저 클리닝 전·후의 성분 분석

레이저 클리닝시 스캔 횟수에 따른 도장면과 산화층의 잔류 여부를 파악하기 위하여 레이저 클리닝부의 표면에 EDS 점 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타낸다.

Fig. 6의 습프라이머 시험편에 대한 EDS 점 분석 결과를 살펴보면, 레이저 클리닝 전과 스캔 횟수 1회에서는 도료의 구성 원소인 Mg, Si, Zn 및 O가 검출되었으며 그 성분량은 유사하였다. 하지만 스캔 횟수 9회와 18회에서는 O와 Fe의 성분만이 검출되었다. 이 조건에서는 습프라이머 도료의 성분은 완전히 제거되었으나 표면에 산화층이 잔류하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에 나타난 에폭시 시험편의 EDS 점 분석 결과 레이저 클리닝 전과 스캔 횟수 12회에서는 도료의 성분인 Mg, Al, Si이 검출되었으며, 18회 이상의 스캔 횟수에서는 도료의 성분이 완전히 제거된 후 도장면 아래의 산화층 성분인 O와 Fe의 성분량이 높게 나타났다.

즉, 본 실험에서 도장면만을 제거하기 위해 선정된 조건에서는 스캔 횟수가 증가하여도 매우 치밀한 결합을 가지는 산화층의 제거는 불가능하였다. 하지만 과도한 스캔 횟수의 경우에는 도장면 제거 후 모재의 손상이 발생할 수 있기 때문에 최소한의 레이저 조사 조건

Fig. 6 EDS spot analysis results on laser cleaned shop primer surface

Fig. 7 EDS spot analysis results on laser cleaned epoxy surface

을 선정해야한다. 또한 산화층까지 제거하기 위해서는 스캔 횟수 이외의 다른 매개변수를 변화시킬 필요가 있으며 이러한 연구 결과를 본 논문 2보와 3보에 나타낸다.

4. 결 론

저출력 펄스 레이저를 이용한 습프라이머 및 에폭시 도장 강판의 레이저 클리닝시 레이저 스캔 횟수에 따른 클리닝부의 특성을 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 도료의 증발 특성을 비교한 결과, 증발점이 상대적으로 낮은 에폭시 도장면의 제거량이 습프라이머 도장면의 제거량에 비해 높게 나타났다. 따라서 열적가공을 수반하는 레이저 클리닝 공정에서 재료의 증발점은 레이저 클리닝 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2) 클리닝부 표면의 조도 측정 결과, 스캔 횟수가 증가함에 따라서 표면의 거칠기가 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서 레이저 클리닝시 과도한 레이저 조사는 모재에 손상을 야기할 수 있으므로 적절한 스캔 횟수의 선정이 중요함을 확인하였다.

3) 레이저 클리닝부의 EDS 점 분석 결과, 레이저 클리닝을 통하여 습프라이머 및 에폭시 도장면을 완전하게 제거할 수 있음을 확인하였으며 조선해양 분야에서 도장면 처리에 레이저 클리닝의 적용 가능성을 확인하였다.

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. J. D. Kim, S. Y. Choi, S. J. Lee and J. Suh, The Study on Weldability of Boron Steel and Hot-stamped Steel by Using Laser Heat Source(I), *Trnas. Korea Soc. Mech. Eng. A.* 38 (12) (2014) 1367-1372.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.12.1367>
2. 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>
3. J. D. Kim, J. E. Kim, M. K. Song, M. S. Han and J. M. Lee, Fundamental Study on Opimum condition for Laser Cleaning of Paint Surface, *Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting*, Busan, Korea (2018) 134.
4. J. D. Kim, J. E. Kim, M. K. Song, M. S. Han, J. H. Hyun and J. M. Lee, A Fundamental Study on the Characteristics of the Cleaned Surface by Scan Speed during Removal of Epoxy Painting by Laser, *Proceedings of the KOSME Spring Conference*, Mokpo, Korea, (2019) 158.
5. J. D. Kim, J. E. Kim, M. K. Song, M. S. Han, J. H. Hyun and J. M. Lee, Fundamental Study on the effect of Pulse Overlap Rate in Laser Cleaning for Removing Epoxy Coating, *2019 Spring Conference of the Korean Welding and Joining Society*, Yeosu, Korea, (2019) 160.
6. J. Y. Oh and B. S. Shin, Photothermal and Photochemical Investigation on Laser Ablation of the Polymide by 355nm UV Laser Processing, *J. Koran Soc. Precis. Engi.* 24 (4) (2007) 147-152.
7. J. Y. Oh and B. S. Shin, A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV Laser Processing, *J. Koran Soc. Precis. Eng.* 24 (2) (2007) 134-139.
8. S. H. Jeong and S. H. Lee, Effects of Process Parameters on Laser Ablation Based Machining and Measurements, *J. Koran Soc. Precis. Engi.* 28 (12) (2011) 1359-1365.
9. I. Y. Chung, K. H. Kang and J. D Kim, The Femto Second Laser Induced Ablation on the Titanium Alloy for Various Beam Overlap Ratio, *J. Korean Soc. Precis. Eng.* 27 (11) (2010) 17-23.