

펄스레이저 클리너를 이용한 우레탄계 중방식도장계의 선택적 도막 제거에 관한 기초적 연구

김동후¹ · 허택영² · 이상형² · 정영수³ · 김인태^{4*}

¹석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, ²박사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과,

³연구교수, 부산대학교, 지진방재연구센터, ⁴교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과

A Fundamental Study on the Selective Coating Removal of a Urethane-Based Heavy-Duty Coating System Using a Pulsed Laser Cleaner

Kim, Dong Hu¹, Heo, Taek Young², Lee, Sang Hyung², Jeong, Young Soo³, Kim, In Tae^{4*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Graduate Student (Doctoral Course), Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Research Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Yangsan, 50612, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract – Surface preparation is a critical step in maintenance repainting of steel bridges because it governs the adhesion and durability of subsequent coatings. In this study, the coating removal behavior and surface characteristics of a conventional heavy-duty urethane coating system on SS275 steel were experimentally evaluated under varying laser power, frequency, scan speed, scan width, number of passes, and pulse width. The removed coating thickness generally increased with increasing power, pulse width, and number of passes, but decreased with increasing scan speed and scan width. Frequency showed a non-monotonic trend, reaching a maximum removal thickness around 100 kHz and then decreasing. After laser irradiation, gloss retention decreased markedly and color difference increased under all conditions, indicating substantial changes in surface appearance. Surface observations confirmed both selective topcoat removal and removal extending to the intermediate coat depending on the laser conditions. In addition, a coating removal parameter (CRP) was proposed to represent the combined effects of the laser parameters, and a strong sigmoidal relationship was identified between CRP and the removed coating thickness.

Keywords – Pulsed laser, Heavy-duty coating, Coating removal, Selective removal, Repainting

1. 서론

강재의 부식은 단면 감소와 재료 성능 저하를 유발하여 구조물의 내구성 및 안전성에 직접적인 영향을 미치므로, 강교량은 도장을 통해 강재를 외부 환경으로부터 차단하고 방식 성능을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 도막은 공용연수가 증가함에 따라 점차 열화되며, 외관

성능 저하뿐만 아니라 차단 성능 약화에 따른 방식 성능 저하 및 강재의 부식 손상을 동반한다. 따라서 강교량의 장기 내구성 확보를 위해서는 적절한 시점에 보수 도장을 실시하여 도막의 보호 성능을 일정 수준 이상 유지할 필요가 있다^{[1]-[4]}.

강교량의 보수도장 공정에서 표면처리는 후속 도막의 부착성과 내구성을 좌우하는 중요 단계이다. 강재 표면에 녹, 밀스케일, 열화 도막, 수분, 공기 또는 염분과 같은 이물질이 잔존하거나 표면 거칠기가 충분하지 않을 경우 도막의 부착 성능은 저하될 수 있다. 이러한 부착 불량은 도막의 부풀음, 균열, 박리 및 조기 부식으로 이어질 가능성이 크다^[5]. 한편 실제 강교량의 보수도장은 현장에서 수행되므로 작업 공간, 접근성, 비산 관

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 10, 2026; revised on June 15, 2026; approved on June 17, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2497 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. itkim@pusan.ac.kr

리 및 시공 환경 측면에서 제약이 크며, 복잡한 형상부나 협소부에서는 기존 표면처리 공법만으로 균일한 품질을 확보하기 어려운 경우가 많다. 이러한 배경에서 최근에는 2차 폐기물 발생이 적고 국부 적용이 가능한 레이저 표면처리가 강교량 보수도장용 표면처리의 대안 기술로 주목받고 있다^{[6]-[14]}.

국내에서는 레이저를 이용한 강재 표면처리의 적용 가능성을 검토하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. Park *et al.*^[7]은 클린 레이저 시스템의 적용 가능성을 검토하였고, 일반환경 및 특수환경 중방식 도장 시험편을 대상으로 도막 및 강재 표면 녹 제거를 실험적으로 검토하였다. 이 연구에서는 도막두께, 표면조도, 현미경 관찰 및 부착력 시험을 통해 레이저 처리면의 재도장 적합성을 검토함으로써, 레이저 공정이 기존 표면처리 공법의 대안으로서의 적용 가능성을 확인하였다. 이어 Moon *et al.*^[8]은 클린 레이저 시스템을 적용하여 도막 제거 효율과 처리면 건전성을 보다 정량적으로 평가하였으며, 레이저 출력, 조사 폭 및 조사 속도에 따른 도막 제거량 변화와 표면 상태를 분석하였다. 또한 레이저 영향 계수와 도막두께 감소량의 관계를 이용한 평가식을 제안하여 공정변수와 제거 성능을 정량적으로 연계할 수 있음을 제시하였다. Park *et al.*^[9]은 이러한 연구를 현장 적용 단계로 확장하여, 클린 레이저 시스템의 현장 적용성 및 경제성을 검토하였다. 한편 Kim *et al.*^[10]은 휴대형 레이저 클리닝 장비를 이용하여 조선용 방청도막의 제거 성능을 평가하였으며, 휴대형 장비의 적용성과 세정 성능 향상 가능성을 검토하였다.

국외에서도 레이저를 이용한 도막 제거 연구는 주로 제거 효율 향상과 모재 손상 최소화의 관점에서 수행되어 왔다. Shamsujjoha *et al.*^[11]은 강재 기판에 대해 레이저 도막 제거를 적용하고, 제거 후 표면 형상, 미세조직, 경도 및 부착 특성을 검토하였다. 이 연구는 레이저 도막 제거가 단순한 세정 공정이 아니라, 모재 표면 상태와 후속 도막의 부착 성능에도 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다. Li *et al.*^[12]은 강구조물 표면을 대상으로 도막 제거와 보수도장 후 부착성을 함께 평가하여, 레이저 제거가 후속 보수도장 공정과 연계되어 검토될 필요가 있음을 제시하였다. Zheng *et al.*^[13]은 연강 기판에 대한 나노초 레이저 도막 제거를 수행하고, 조사 조건에 따른 제거 거동과 모재 영향의 차이를 분석하였다.

Tong *et al.*^[14]은 해양용 강재의 레이저 도막 제거에서 가우시안 빔과 평탄형 빔을 비교하여, 빔 형상이 제거 후 표면 품질에 미치는 영향을 검토하였다. 이러한 국외 연구들은 공정변수에 따라 잔류 도막이 남거나 모재 용융, 표면 재응고와 같은 손상이 발생할 수 있음을 보여주었으며, 이는 레이저 제거 공정에서 제거 성능과 기재 손상 억제를 함께 고려해야 함을 보여준다.

이러한 기존 국내외 연구는 주로 도막 전체의 제거 가능성, 제거 효율 또는 제거 후 표면 건전성 평가에 초점을 두고 있다. 그리고 강구조물 보수도장 관점에서 건전한 하도를 보존한 상태로 열화된 상도 및 중도만을 선택적으로 제거하는 전략은 상대적으로 충분히 다루어지지 않았다. 특히 무기징크 하도층은 현장 재도장으로 그 품질을 확보하는 것이 곤란하다. 따라서 모든 도막을 일괄 제거하기보다는 노화된 상도와 중도만 선택적으로 제거하고 무기징크 하도는 남겨둘 수 있는 선택적 도막 제거를 위한 레이저 처리 기술 개발이 필요하다. 또한 이러한 선택 제거 성능은 단순히 제거 가능 여부만으로는 판단하기 어렵고, 제거된 도막의 양과 잔존 상태를 함께 반영할 수 있는 정량적 지표에 관한 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 SS275 강재에 적용된 일반 우레탄 중방식 도장계를 대상으로, 펄스 레이저의 출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭에 따른 도막 제거 특성과 표면 특성을 실험적으로 검토하였다. 특히 도막 제거량, 표면조도, 외관 변화 및 도막 제거 효율을 종합적으로 검토함으로써, 강교량 보수도장용 표면처리 공법으로서 상·중도 선택 제거의 적용 가능성을 실험적으로 검토하였다.

2. 시험 개요 및 방법

2.1 레이저 개요

레이저는 발진 방식에 따라 연속적으로 빛을 방출하는 연속파(Continuous wave, CW) 레이저와 일정한 시간 간격으로 에너지를 방출하는 펄스 레이저(Pulsed laser)로 구분할 수 있다. Fig. 1(a), Fig. 1(b)는 각각 연속파 레이저와 펄스 레이저의 발진 형태를 시간에 따른 출력 변화로 개략적으로 나타낸 것이다. 연속파 레이저

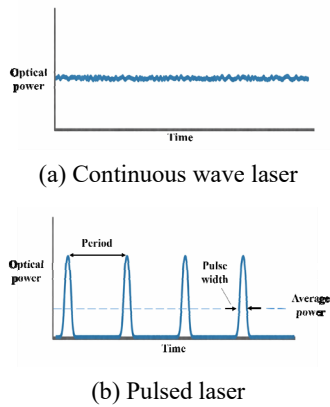


Fig. 1. Comparison of CW and Pulsed Laser Emission

Table 1. Laser specifications

Manufacturer	Dongil laser tech.
Laser model	EZ clean P-500
Laser source	JPT
Lens	F-254
Laser power	500 W
Laser wavelength	1064 nm
Pulse width	30 ns–500 ns
Frequency	1 kHz–4000 kHz
Scan width	10 mm–160 mm
Maximum pulse energy	50 mJ
scanning speed	depending on scan width

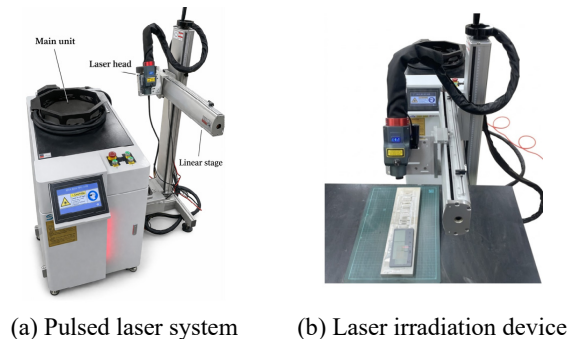


Fig. 2. Pulsed laser system and laser irradiation device

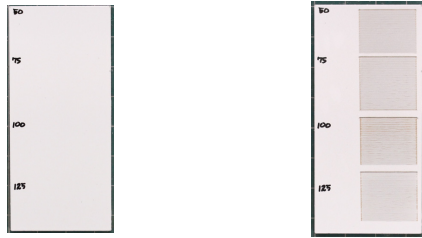
는 일정한 출력으로 지속적으로 에너지를 방출하는 방식으로, 주로 용접이나 절단과 같은 열 가공 공정에 널리 사용된다. 반면 펄스 레이저는 매우 짧은 시간 동안 높은 피크 출력을 발생시키며, 재료 표면의 국부 영역에 에너지를 집중적으로 전달할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 펄스 레이저는 기판의 열영향을 최소화하면서 표면 오염물, 산화물, 또는 도막을 선택적으로 제거할 수 있어 레이저 클리닝 및 표면처리에 주로 활용된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 펄스 레이저를 사용하였으며, 실험 장비로는 Dongil Tech사의 EZ Clean P-500 모델을 사용하였다. 레이저 조사 장치는 이동거리 400 mm의 전동 스테이지로 구성하였으며, 이송 속도는 5 mm/s–50 mm/s 범위에서 설정할 수 있고 가속 구간 없이 일정하게 유지되도록 하였다. 레이저 장비의 주요 사양은 Table 1에 제시하였고, 펄스 레이저 시스템 및 조사 장치는 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 Table 1의 scanning speed는 레이저 빔의 스캐닝 속도를 의미하며, 이후 실험 변수로 사용한 scan speed는 시험편이 장착된 전동 스테이지의 이송속도를 의미한다.

2.2 시험편 제작

본 시험에 사용된 시험편은 SS275 강재를 150 mm×70 mm×6 mm 크기로 절단한 후, SSPC-SP 10^[15] 기준에 따라 블라스트 처리하였다. 그리고 표준시방서(KCS 14 31 40)^[16]에 따른 강구조물용 일반 중방식 우레탄계 도장 사양을 적용하여 도장 시험편을 제작하였다. 도장계는 무기징크 하도, 에폭시계 중도 및 우레탄계 상도로 구성하였다. 또한 레이저 조사 후 제거 깊이에 따른 도막층 구분이 가능하도록 상도, 중도 및 하도는 서로 다른 색상으로 도장하였다. 적용된 도장계의 세부 사양과 건조 도막두께 측정 결과는 Table 2에 제시하였으며, 시험편의 레이저 조사 전후의 대표 외관은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2. Coating specifications and dimensions of the specimens

Surface condition	Coating system	Coating layer (μm)			Designed dry film thickness (μm)	Dimensions (mm)
		Bottom coat	Intermediate coat	Top coat		
Blasted Specimens	Urethane Coating	Inorganic Zinc Primer	high solid epoxy	Urethane	255	150*70*6
		75	100	80		



(a) Before laser irradiation (b) After laser irradiation

Fig. 3. Coating system and representative photographs of the urethane-coated SS275 specimens



(a) Gloss meter



(b) Colorimeter



(c) Dry film thickness gauge



(d) VR-5000
3D optical profiler

Fig. 4. Measuring equipment

2.3 시험 방법

2.3.1 측정 방법

도막 제거 특성을 평가하기 위하여 레이저 조사 전·후의 도막두께를 측정하여 도막 제거량을 산정하였으며, 표면조도 측정을 통해 레이저 처리에 따른 표면 거칠기 변화를 분석하였다. 또한 카메라 촬영 및 현미경 관찰을 바탕으로 외관 조사를 수행하여 도막 제거 상태와 잔존 도막의 분포를 확인하였다. 본 연구에서 사용한 주요 측정 장비는 Fig. 4에 나타내었다.

2.3.2 도막 제거량

도막 제거량은 전자식 도막두께측정기(PosiTector 6000, DeFelsko)와 비접촉 3차원 표면형상 측정기(VR-5000, Keyence)를 이용하여 측정하였다. 전자식 도막두께측정기를 이용한 측정은 KS M ISO 2808^[17]에 준하여 수행하였으며, 각 시험편의 레이저 조사 부위에

서 5개 지점을 측정한 후 조사 전·후의 평균값 차이로부터 도막 제거량을 산정하였다. 또한 비접촉 3차원 표면형상 측정기를 이용한 도막 제거량은 취득한 높이 데이터에서 건전부를 기준면으로 설정한 후, 조사부와의 평균 높이차를 계산하여 산정하였다. Table 2에 제시된 도막두께는 도장계 사양을 나타낸 것으로, 실제 시험편의 건조도막 두께는 도장 및 건조 과정에 따라 일부 편차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 도막 두께가 아닌 각 시험편에서 측정한 레이저 조사 전·후 도막두께의 평균값 차이를 이용하여 도막 제거량을 산정하였다.

2.3.3 표면조도

표면조도는 전자식 표면조도 측정기와 비접촉 3차원 표면형상 측정기(VR-5000, Keyence)를 이용하여 측정하였다. 전자식 표면조도 측정기를 이용한 측정은 KS B ISO 4287^[18]에 따라 각 시험편의 레이저 조사 부위에서 10개 지점에 대해 수행하였으며, 측정값의 평균을 해당 조건의 대표 표면조도 값으로 사용하였다. 비접촉 3차원 표면형상 측정기는 높이 분해능 0.1 μm 의 비접촉 광학식 측정 장비로, 조사부의 3차원 형상을 선포면 단위로 취득하여 표면 형상 및 표면조도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 조사부 전체의 형상 데이터를 취득한 후, 종(L) 방향과 횡(T) 방향의 선형 프로파일을 각각 추출하여 표면조도를 산정하였다.

2.3.4 광택 및 색차

광택 및 색차는 레이저 처리에 따른 도장 표면의 외관 변화를 평가하기 위한 보조지표로 측정하였다. 광택 측정은 KS M ISO 2813^[19]에 준하여 60° 경면 반사율 조건에서 수행하였으며, 각 레이저 조사부에 대해 5회

Table 3. National Bureau of Standards(NBS) ratings^[21]

NBS units	Critical remarks of color difference	
0.0–0.5	Trace	Extremely slight change
0.5–1.5	Slight	Slight change
1.5–3.0	Noticeable	Perceivable change
3.0–6.0	Appreciable	Marked change
6.0–12.0	Much	Extremely marked change
12.0 or more	Very much	Change to other color

측정한 후 산술평균값을 대표값으로 사용하였다. 또한 레이저 처리 전후의 광택 변화를 정량적으로 비교하기 위하여 식 (1)과 같이 광택 보유율(%)을 산정하였다. 색차 측정은 색차계를 이용하여 KS A 0063^[20]에 준하여 식 (2)로 색차를 산정하였다. 또한 색차값은 NBS unit으로 환산하여 Table 3의 등급에 따라 분류하였다^[21].

$$\text{광택 보유율}(\%) = \frac{GU_{after}}{GU_{initial}} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

여기서, L^* 는 밝기를 나타내며 검정과 흰색의 관계이고, a^* 는 값이 클수록(+) 빨강, 값이 작을수록(-) 녹색을 뜻하고 b^* 는 값이 클수록(+) 노랑, 값이 작을수록(-) 파랑색에 가까워진다.

2.3.5 외관 조사 방법

레이저 조사에 따른 도막의 외관 변화를 확인하기 위하여, 각 시험편에 대하여 조사 전후의 전체 사진과 조사부 확대사진을 각각 촬영하여 비교하였다. 이를 통해 색상 변화, 도막의 박리 및 손상 양상, 잔존 도막의 유무, 그리고 열영향에 따른 표면 흔적을 정성적으로 관찰하였다. 또한 각 도막층의 색상 차이를 이용하여 제거 깊이에 따른 도막층 노출 양상을 함께 평가하였다. 또한 확대사진을 바탕으로 조사 조건에 따른 표면 상태의 차이를 비교·평가하였다.

3. 레이저 실험 결과

3.1 레이저 조사 조건

각 공정변수가 도막 제거량에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 실험은 출력과 각 주요 공정변수를 조합하여 수행하였다. 기준 조사조건은 주파수 100 kHz, 스캔 속도 10 mm/s, 스캔 폭 40 mm, 중첩횟수 1회 및 펄스 폭 500 ns로 설정하였다. 출력은 100, 200, 300, 400 W 및 500 W로 변화시켰으며, 각 실험군에서는 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭 중 하나를 변화시키고 나머지 조건은 기준값으로 유지하였다. 이때

주파수는 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 400, 500 kHz 및 600 kHz로 설정하였고, 스캔 속도는 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 mm/s 및 40 mm/s로 설정하였다. 스캔 폭은 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 mm 및 90 mm로 설정하였으며, 중첩횟수는 1, 2, 4회 및 6회로 설정하였다. 또한 펄스 폭은 100, 200, 300, 400 ns 및 500 ns로 설정하였다. 전체 조사 조건은 총 164가지로 구성하였으며, 자세한 레이저 공정변수 사양은 Table 4에 제시하였다.

3.2 외관 조사 결과

레이저 조사부의 외관은 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭에 따라 상이하게 나타났다. 전반적으로 도막 제거량이 큰 조건에서는 조사부의 표면 거칠기와 색조 변화가 더욱 뚜렷하게 관찰되었으며, 제거량이 작은 조건에서는 표면 변화가 비교적 완만하게 나타났다. 이러한 외관 변화의 전체적인 경향을 대표적으로 비교하기 위하여, 본 연구에서는 300 W 조건에서 획득한 조사부 확대사진 중 대표 조건을 선정하여 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 5에 나타난 것과 같이 주파수 조건은 100 kHz에서 제거 흔적이 비교적 뚜렷하게 나타났으며, 스캔 속도가 증가할수록 조사 자국과 표면 변화는 완화된 경향을 보였다. 또한 스캔 폭이 증가할수록 제거 흔적은 벌어지는 반면, 중첩횟수와 펄스 폭이 증가할수록 조사부의 외관 변화와 제거 양상은 더욱 뚜렷하게 나타났다. 예를 들어, 스캔 속도 5 mm/s 조건에서는 넓고 거친 제거 자국이 형성된 반면, 20 mm/s 조건에서는 조사 흔적이 상대적으로 약하게 나타났다. 또한 1 pass 조건에 비해 6 passes 조건에서 제거 범위와 외관 변화가 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 본 연구에서는 각 도막층의 색상 차이와 도막 제거량을 종합적으로 검토하여 제거 거동을 평가하였다. 그러나 이는 표면 외관에 근거한 정성적 판단이므로, 상도와 중도의 제거 상태 및 하도의 잔존 여부를 직접 확인하기 위해서는 추가적인 단면 관찰 또는 성분 분석이 필요하다.

3.3 광택 및 색차

레이저 조사에 따른 우레탄 도막의 외관 변화 특성을

Table 4. Laser irradiation conditions according to the main experimental variables

Main variable	Power (W)	Frequency (kHz)	Scan speed (mm/s)	Scan width (mm)	Number of passes (N)	Pulse width (ns)
Frequency	100, 200, 300, 400, 500	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300	10	40	1	500
Scan speed	100, 200, 300, 400, 500	100	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	40	1	500
Scan width	100, 200, 300, 400, 500	100	10	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	1	500
Passes	100, 200, 300, 400, 500	100	10	40	1, 2, 4, 6	500
Pulse width	100, 200, 300, 400, 500	100	10	40	1	100, 200, 300, 400, 500

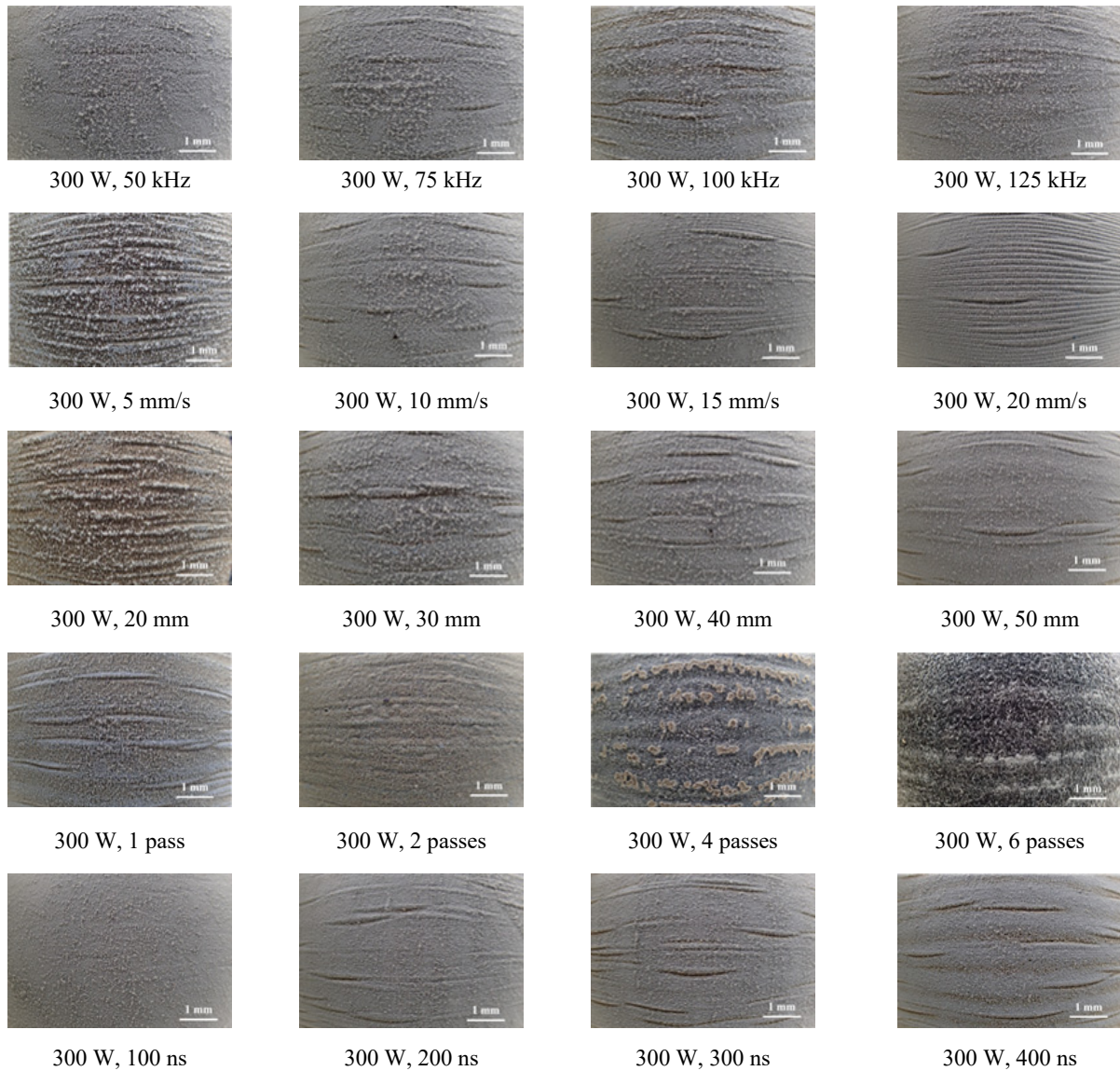
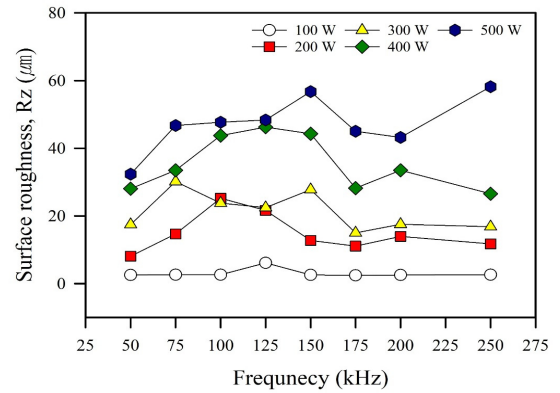


Fig. 5. Representative close-up image of the surface

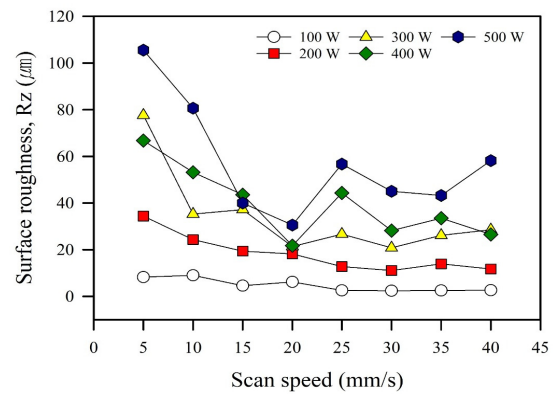
Table 5. Gloss retention, color difference, and NBS classification under representative laser irradiation conditions

Parameter	Representative conditions	Gloss retention after irradiation (%)	Color difference (ΔE)	NBS classification
Frequency	100 W, 50 kHz	0.74	7.82	Much
	100 W, 100 kHz	0.19	10.89	Much
	100 W, 125 kHz	0.32	9.55	Much
Scan speed	200 W, 5 mm/s	0.04	23.07	Very Much
	200 W, 10 mm/s	0.03	13.69	Very Much
	200 W, 20 mm/s	0.06	12.44	Very Much
Scan width	300 W, 20 mm	0.02	34.27	Very Much
	300 W, 40 mm	0.03	14.18	Very Much
	300 W, 50 mm	0.03	14.35	Very Much
Number of passes	400 W, 1 pass	0.02	33.94	Very Much
	400 W, 4 passes	0.06	50.75	Very Much
	400 W, 6 passes	0.13	45.85	Very Much
Pulse width	500 W, 100 ns	0.03	16.50	Very Much
	500 W, 300 ns	0.02	32.32	Very Much
	500 W, 400 ns	0.02	33.02	Very Much

평가하기 위하여, 모든 공정변수에 대하여 레이저 조사 전후의 광택 보유율과 색차를 측정하였다. 그 결과, 모든 조건에서 레이저 조사 후 광택 보유율은 초기값 대비 현저히 감소하여 0.02 %–0.74 % 수준으로 나타났으며, 이는 표면 광택이 거의 완전히 소실되었음을 의미한다. 또한 색차(ΔE)는 7.82–50.75 범위로 나타났으며 NBS 분류 기준상 전 조건에서 ‘많음’ 또는 ‘매우 많음’ 수준의 변색이 확인되었다. 이러한 결과는 레이저 조사가 도막 제거뿐만이 아니라 도막 표면의 시각적 및 광학적 특성에도 큰 변화를 유발함을 보여준다. 각 대표 조건에서의 광택 보유율, 색차(ΔE) 및 NBS 분류 결과는 Table 5에 제시하였다.



(a) Frequency



(b) Scan speed

Fig. 6. Surface roughness (Rz) as a function of laser irradiation parameters

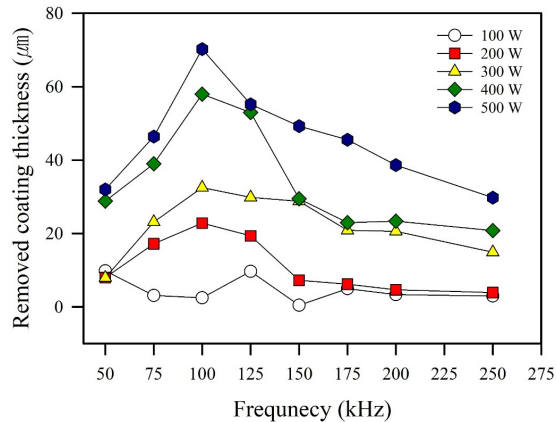
3.4 표면 조도

보수 및 재도장 시 표면처리의 목적 중 하나는 후속 도막의 부착성 확보를 위해 피도장면에 적절한 표면조도를 부여하는 것이다. 적절한 표면 거칠기가 형성되면 피도장면의 유효 표면적이 증가하고 도막과 기재 사이의 기계적 결합 효과가 향상될 수 있다. 이에 본 연구에서는 레이저 조사 후 형성된 표면조도를 평가하였다.

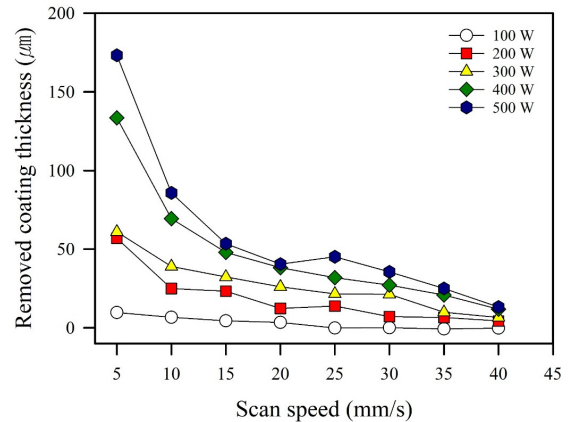
주파수, 스캔 속도에 따른 표면조도(Rz) 결과는 각각 Fig. 6(a), Fig. 6(b)에 나타내었다. 표면조도는 비접촉 3차원 표면형상 측정기에서 얻은 선조도 Rz 값을 기준으로 비교하였으며, KCS^[16]에서 제시하는 표면조도 25 μm –75 μm 참고 범위와 비교하여 분석하였다. 그 결과, 100 W 조건은 전반적으로 해당 범위 미만의 값을 나타내어 적정 표면조도 형성이 제한적인 것으로 확인되었다. 반면 200 W 이상에서는 레이저 공정변수 조합에 따라 참고 범위를 만족하는 조건이 확인되었으며, 특히 스캔 폭 조건에서는 400 W에서 시험한 모든 스캔 폭

조건에서 표면조도가 KCS 참고 범위($25\ \mu\text{m}$ – $75\ \mu\text{m}$)에 포함되어, 비교적 안정적으로 적정 표면조도를 확보할 수 있었다. 또한 스캔 속도, 중첩횟수 및 펄스 폭 조건에서도 일부 조합은 참고 범위에 포함되었으나, 저출력 조건에서는 기준 미만의 값을 나타냈고 일부 고출력 조

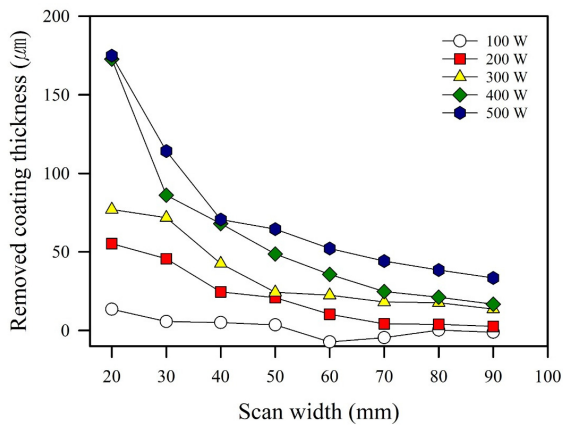
건에서는 $75\ \mu\text{m}$ 를 초과하는 경우도 확인되었다. 따라서 표면조도 관점에서 적정 레이저 조사조건은 단일 공정변수에 의해 결정되기보다는 출력과 각 공정변수의 조합에 의해 좌우되는 것으로 판단된다.



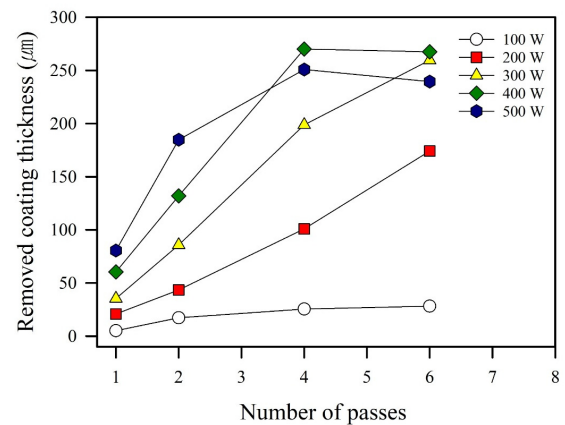
(a) Frequency



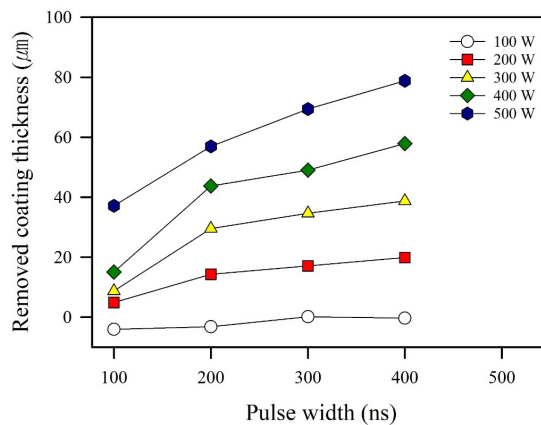
(b) Scan speed



(c) Scan width



(d) Number of passes



(e) Pulse width

Fig. 7. Removed coating thickness as a function of laser irradiation parameters

3.5 레이저 공정변수에 따른 도막 제거량

출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭에 따른 도막 제거량 결과를 Fig. 7(a)–Fig. 7(e)에 제시하였다. Fig. 7에서 나타난 것과 같이, 전반적으로 모든 조건에서 출력이 증가할수록 도막 제거량은 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 공정변수별 도막 제거량은 서로 상이하게 나타났으며, 일부 변수는 단조적인 증감 경향을 보인 반면, 일부 변수는 특정 조건에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 비단조 거동을 보였다.

주파수의 경우, 도막 제거량은 약 100 kHz 부근까지 증가한 후 다시 감소하는 경향을 나타냈으며, 이러한 비단조 거동은 특히 400 W 및 500 W 조건에서 뚜렷하게 확인되었다(Fig. 7(a)). 이는 저주파수 영역에서는 주파수 증가에 따라 단위 시간당 조사되는 펄스 수가 증가하여 펄스 중첩 효과가 향상되기 때문으로 판단된다. 반면 평균 출력이 일정한 조건에서는 주파수가 증가할수록 단위 펄스당 에너지가 감소하므로, 일정 주파수 이상에서는 각 펄스가 도막에 전달하는 에너지가 감소하여 제거 효율이 저하될 수 있다. 따라서 약 100 kHz 부근까지는 제거량이 증가하였으나, 그 이상의 주파수에서는 제거량이 다시 감소하는 비단조 거동이 나타난 것으로 판단된다.

스캔 속도와 스캔 폭은 증가할수록 도막 제거량이 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 7(b), Fig. 7(c)). 이는 각각 조사 시간의 감소와 단위 면적당 조사 에너지의 분산에 의한 것으로 판단된다. 특히 저속 및 좁은 스캔 폭 조건에서는 고출력과 결합될 때 높은 제거량이 나타난 반면, 고속 및 넓은 스캔 폭 조건에서는 출력 증가에 따른 제거량 차이가 상대적으로 작게 나타났다.

중첩횟수는 증가할수록 도막 제거량이 뚜렷하게 증가하였으며, 이는 동일 영역에 대한 반복 조사로 누적 에너지 투입량이 증가한 결과로 볼 수 있다(Fig. 7(d)). 다만, 고출력 조건에서는 4회 이상 반복 조사 시 제거량 증가폭이 다소 완만해지는 경향이 관찰되었다. 펄스 폭 또한 증가할수록 도막 제거량이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 그 변화 양상은 중첩횟수에 비해 비교적 완만하게 나타났으며, 특히 200 W 이상의 조건에서 이러한 경향이 보다 명확하게 확인되었다(Fig. 7(e)).

도막 제거량은 출력 증가에 따라 전반적으로 증가하

였으며, 스캔 속도, 스캔 폭 및 중첩횟수와 같은 조사 중첩 및 에너지 밀도 관련 인자의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 반면, 주파수는 특정 최적 구간이 존재하는 비단조 거동을 보였고, 펄스 폭은 비교적 완만한 증가 경향을 나타냈다. 따라서 레이저 도막 제거 공정에서는 단일 변수보다 출력과 각 공정변수를 복합적으로 고려한 최적화가 필요한 것으로 판단된다.

3.6 도막 제거 인자와 도막 제거량의 관계

Moon *et al.*^[5]은 레이저 출력, 스캔 폭 및 스캔 속도와 도막 제거량의 관계를 분석하여, 출력이 증가할수록 도막 제거량은 증가하고 스캔 폭 및 스캔 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보고하였다. 이러한 경향은 본 연구 결과와도 유사하게 나타났다. 이에 본 연구에서도 기존 영향인자인 레이저 출력, 주파수, 스캔 속도 및 스캔 폭에 더하여 펄스 폭과 중첩횟수의 영향을 함께 반영할 수 있는 도막 제거 인자(coating removal parameter, CRP)를 도입하였다. CRP는 식 (3)과 같이 정의하였으며, 각 레이저 조사조건에 대한 CRP 값을 산출하여 도막 제거량과의 관계를 평가하였다.

$$CRP = \frac{P \times f \times n \times \tau}{v \times w} \quad (3)$$

여기서, P 는 레이저 출력(W), f 는 주파수(kHz), n 는 중첩횟수(-), τ 는 펄스 폭(ns), v 는 스캔 속도(mm/s), w 는 스캔 폭(mm)이다.

또한 CRP와 도막 제거량의 정량적 관계를 나타내기 위하여 시그모이드 회귀식을 적용하였으며, 그 결과를 식 (4)에 나타내었다. Fig. 8은 CRP와 도막 제거량의 관계 및 회귀곡선을 나타낸다. CRP가 증가할수록 도막 제거량은 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 회귀 분석 결과 두 변수 사이에는 0.93의 높은 결정계수(R^2)를 나타냈다. 이때 회귀식의 상한값은 본 연구에서 적용한 도장계의 총 도막두께인 255 μm 를 기준으로 설정하여, 도막이 완전히 제거되는 조건에서의 물리적 한계를 반영하였다. 또한 도막 제거량 구간에 따라 제거 범위를 구분하면, 초록색 영역은 상도 두께 범위에 해당하는 제거량 구간이며, 회색 영역은 중도 두께 범위까지 포함하는 제거량 구간이다.

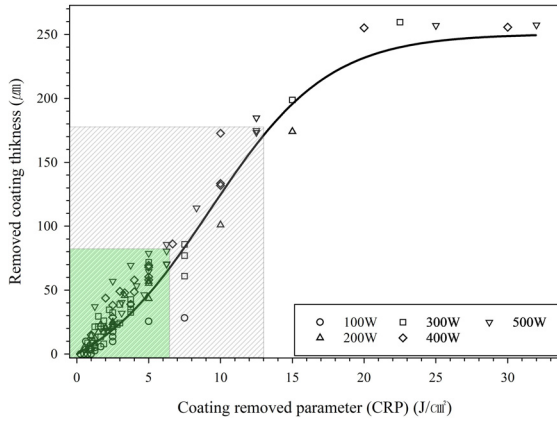


Fig. 8. Regression curve for removed coating thickness according to CRP

CRP와 도막 제거량의 회귀관계를 이용하여 분석한 결과, CRP 약 6.1은 상도 두께 수준의 제거량에 대응하였으며, CRP 약 13.1은 상도와 중도의 누적 두께 수준의 제거량에 대응하는 것으로 나타났다. 따라서 CRP가 약 13.1 이하인 조건은 무기징크 하도의 잔존이 기대되는 영역으로 해석할 수 있으며, 이를 초과하는 조건에서는 하도 제거 가능성이 존재하는 것으로 판단된다.

즉, CRP를 이용하면 레이저 조사조건에 따른 도막 제거량을 정량적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 상도의 선택적 제거와 중도까지 포함하는 제거 범위를 구분하여 판단할 수 있다. 따라서 CRP는 레이저 조사조건들의 복합적 영향을 하나의 인자로 정리하고, 보수도장 목적에 따른 선택적 도막 제거 가능 범위를 평가하는 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 제안한 CRP와 도막 제거량의 관계는 SS275 강재에 적용된 우레탄계 증방식 도장제와 본 연구에서 사용한 펄스 레이저 장비 및 조사조건 범위를 기반으로 도출된 경험적 회귀식이다. 따라서 다른 도장제, 시험편 형상, 레이저 장비 또는 조사조건에 직접 적용하기 위해서는 추가적인 검증이 필요하다.

$$y = -29.58 + \frac{280}{1 + \exp\left(-\frac{x - 9.68}{4.07}\right)^{0.91}} \quad (4)$$

여기서, y 는 도막 제거량(μm), x 는 CRP (J/cm^2)를 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 SS275 강재에 적용된 일반 우레탄계 증방식 도장제(무기징크 하도, 에폭시 중도, 우레탄 상도)를 대상으로, 펄스 레이저의 출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭이 도막 제거 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 또한 도막 제거량, 표면조도, 광택 및 색차, 외관 관찰 결과를 종합하여 강교량 보수도장용 표면처리 공법으로서 상·중도 선택적 제거 가능성을 검토하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 조사 후 모든 조건에서 광택 보유율은 현저히 감소하고 색차는 크게 증가하여, 레이저 조사가 도막 표면의 시각적·광학적 특성에 큰 변화를 유발하는 것으로 나타났다.
- (2) 표면조도는 레이저 출력 및 공정변수의 조합에 따라 달라졌으며, 100 W 조건에서는 전반적으로 적정 표면조도 형성이 제한적이었다. 반면 200 W 이상에서는 일부 조건에서 KCS 참고 범위($25\ \mu\text{m}$ – $75\ \mu\text{m}$)를 만족하는 표면조도가 형성되었고, 특히 스캔 폭 조건에서는 400 W에서 비교적 안정적으로 적정 범위를 확보하였다.
- (3) 도막 제거량은 전반적으로 출력이 증가할수록 증가하였으며, 중첩횟수 증가는 제거량 증가에 가장 직접적인 영향을 미치는 인자로 나타났다. 반면 스캔 속도와 스캔 폭이 증가할수록 제거량은 감소하는 경향을 보였다. 주파수는 약 100 kHz 부근까지 제거량이 증가한 후 다시 감소하는 비단조 거동을 나타내었으며, 펄스 폭은 증가할수록 제거량이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 저출력 영역에서는 그 영향이 상대적으로 제한적이었다.
- (4) 레이저 조사 후 외관을 관찰한 결과, 일부 조건에서는 도막 제거량 및 색상 변화로부터 상도 또는 중도 제거 가능성이 확인되었으며, 다른 조건에서는 중도층 두께 범위에 해당하는 제거량이 나타났다.
- (5) 본 연구에서는 레이저 출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭의 복합적 영향을

하나의 지표로 정리한 도막 제거 인자(CRP)를 제안하였다. CRP를 이용하여 상도 제거 구간과 중도 제거 구간을 구분할 수 있었으며, CRP와 도막 제거량 사이에는 결정계수(R^2) 0.93의 양호한 정량적 관계가 확인되었다.

이 연구를 통하여, 펄스레이저를 이용한 도막 제거 공정은 강교량 보수도장용 표면처리 공법으로서 적용 가능성이 있으며, 특히 하도와 모재의 손상을 최소화하면서 상·중도를 선택적으로 제거하기 위한 조건 최적화의 가능성을 확인하였다. 그러나 선택 제거 여부를 보다 명확히 판단하고 현장 적용성을 높이기 위해서는 향후 단면 분석, 성분 분석 및 보수도장 후 부착성 평가를 포함한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00562480).

참고문헌(References)

- [1] Koch, G.H., Brongers, M.P.H., Thompson, N.G., Virmani, Y.P., and Payer, J.H. (2002) *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*, FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, USA.
- [2] Song, S.Y., Yoo, H., Kim, I.-T., and Jeong, Y.-S. (2023) Evaluation of Deterioration Life for Heavy-Duty Coating Using Growth Curve Model, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.3, pp.103-111 (in Korean).
- [3] Lee, S.H., Jeong, Y.-S., and Kim, I.-T. (2024) Evaluation of Coating Degradation on Steel Bridges Due to Indoor and Outdoor Ultraviolet Exposure Tests, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.5, pp.263-274 (in Korean).
- [4] Kim, D.H., Lee, S.H., Jeong, Y.S., and Kim, I.-T. (2025) Comparative Durability Evaluation of Waterborne and Solvent-Based Coatings for Marine Steel Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.3, pp.111-122 (in Korean).
- [5] Croll, S.G. (2020) Surface Roughness Profile and Its Effect on Coating Adhesion and Corrosion Protection: A Review, *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, Vol.148, 105847.
- [6] JSCE (Japan Society of Civil Engineers) (2022) *Report of the Subcommittee on Technical Evaluation of Laser Surface Preparation for Steel Structures*, Steel Structure Subcommittee (in Japanese).
- [7] Park, J.-E., Kyung, K.-S., Moon, M.-G., Koh, K.-H., and Hong, Y.J. (2019) Experimental Study on Application of Clean Laser System in Surface Preparation on Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.6, pp.447-458 (in Korean).
- [8] Moon, M.-G., Kyung, K.-S., Park, J.-E., Yun, I.-S., and Hong, Y.J. (2020) Evaluation of Coating Removal Efficiency and Integrity by Applying a Clean Laser System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.6, pp.375-384 (in Korean).
- [9] Park, J.-E., Kyung, K.-S., Moon, M.-G., Koh, K.H., and Hong, Y.J. (2021) Field Applicability and Economic Evaluation of Clean Laser System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.109-118 (in Korean).
- [10] Kim, J.-E., Song, M.-K., Lee, J.-M., Hyun, J.-H., Lee, G.-H., and Kim, J.-D. (2021) Experimental Investigations into Improvement of Cleaning Performance for Anticorrosive Paints for Shipbuilding using Handheld-Type Laser Cleaning Equipment, *Journal of Welding and Joining*, KWJS, Vol.39, No.5, pp.536-541 (in Korean).
- [11] Shamsujjoha, M., Agnew, S.R., Melia, M.A., Brooks, J.R., Tyler, T.J., and Fitz-Gerald, J.M. (2015) Effects of Laser Ablation Coating Removal (LACR) on a Steel Substrate: Part 1: Surface Profile, Microstructure, Hardness, and Adhesion, *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, Vol.281, pp.193-205.
- [12] Li, X., Huang, T., Chong, A.W., Zhou, R., Choo, Y.S., and Hong, M. (2017) Laser Cleaning of Steel Structure Surface for Paint Removal and Repaint Adhesion, *Opto-Electronic Engineering*, Vol.44, No.3, pp.340-344.
- [13] Zheng, Z., Wang, C., Huang, G., Feng, W., and Liu, D. (2021) Effect of Defocused Nanosecond Laser Paint Removal on Mild Steel Substrate in Ambient Atmosphere, *Materials*, MDPI, Vol.14, No.20, 5969.

- [14] Tong, Y., ShangGuan, J., Ren, X., Yuan, A., Liu, J., Lian, Z., Hu, X., Ma, J., Yang, Z., and Wang, D. (2022) Surface Quality of Laser Paint Removal of Marine Steel: A Comparative Study Using a Gaussian Beam and a Flat-Top Beam, *Applied Optics*, Vol.61, No.9, pp.2237–2246.
- [15] AMPP (2024) *Near-White Metal Blast Cleaning*, SSPC-SP 10-NACE No. 2-2024, USA.
- [16] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016) Paint Coating, KCS 14 31 40:2016 (in Korean).
- [17] KATS (Korean Agency for Technology and Standards) (2022) Paints and Varnishes—Determination of Film Thickness, KS M ISO 2808:2022 (in Korea).
- [18] KATS (Korean Agency for Technology and Standards) (2024) Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method—Terms, Definitions and Surface Texture Parameters, KS B ISO 4287:2024 (in Korea).
- [19] KATS (Korean Agency for Technology and Standards) (2021) Paints and Varnishes—Determination of Gloss Value at 20°, 60° and 85°, KS M ISO 2813:2021 (in Korea).
- [20] KATS (Korean Agency for Technology and Standards) (2025) Method for Specification of Colour Differences for Opaque Materials, KS A 0063:2025 (in Korea).
- [21] National Bureau of Standards (1968) *Nimeroff I: Colorimetry*, National Bureau of Standards Monograph, Washington, DC, No.104.

요 약: 강교량의 보수도장 공정에서 표면처리는 후속 도막의 부착성 및 내구성을 좌우하는 중요 단계이며, 최근에는 국부 처리와 선택적 제거가 가능한 레이저 표면처리가 대안 공법으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 SS275 강재에 적용된 일반 중방식 우레탄계 도장계를 대상으로, 펄스 레이저의 출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭 변화에 따른 도막 제거 특성과 표면 특성을 실험적으로 평가하였다. 그 결과, 도막 제거량은 전반적으로 출력, 펄스 폭과 중첩횟수가 증가할수록 증가하였으며, 스캔 속도와 스캔 폭이 증가할수록 감소하였다. 주파수는 약 100 kHz 부근에서 최대 제거량을 보인 후 다시 감소하는 비단조 거동을 나타냈다. 또한 레이저 조사 후 모든 조건에서 광택 보유율은 크게 감소하고 색차는 현저히 증가하여 도막 표면의 시각적·광학적 특성이 크게 변화하였다. 외관 관찰 결과 레이저 조건에 따라 상도의 선택적 제거와 중도까지 포함한 제거 양상이 모두 확인되었다. 아울러 레이저 출력, 주파수, 스캔 속도, 스캔 폭, 중첩횟수 및 펄스 폭의 복합적 영향을 반영한 도막 제거 인자(CRP)를 제안하였으며, CRP와 도막 제거량 사이에는 높은 시그모이드 회귀 관계가 확인되었다.

핵심용어: 펄스 레이저, 중방식 도장계, 도막 제거, 선택적 제거, 보수도장
