

강교 보수도장의 표면처리를 위한 임펠라 블라스트와 스틸볼의 상관관계 분석을 통한 블라스트 효율 향상

Improvement of Blast Efficiency by Correlation Analysis of Impella Blast and Steel Balls for Surface Treatment of Steel Bridges

장병하^{1*} · 장동욱¹ · 서명국² · 이호연² · 박재현³

Byoung Ha Chang, Dong Wook Jang, Myoung Kook Seo, Ho Yeon Lee and Jae Hyun Park

Received: 11 Nov. 2021, Revised: 02 Dec. 2021, Accepted: 12 Dec. 2021

Key Words : Impellar blast(임펠라 블라스트), Steel ball(스틸 볼), Steel bridge(강교), Surface treatment(표면처리)

Abstract: The demand for the re-painting of steel bridges is increasing, but surface treatment is still centered on human resources for on-site re-painting processes. Worker safety accidents continue to occur because the work is performed in a narrow space. Recently, PS balls with excellent surface treatment have been used for blasting, but the working environment is poor due to the large amount of dust generated. In this study, an effective surface treatment method using impeller blasting equipment was developed. The correlation between steel ball size, impeller rotation speed, and exposure time was studied to optimize the efficiency of the surface treatment.

1. 서 론

국내에서는 1900년도 한강 B선 철도교를 시작으로 다수의 강교가 설치되어 왔으며 1995년부터 강교 설치가 급증하기 시작하였다. 이에 따라 2010년 이후 강교의 노후화로 인하여 강교의 유지보수를 위한 재도장 시장이 증가하고 있다.

강교 부식 요인은 주로 염화물계 제설제 사용, 해양 환경하의 구조물 건설, 부식 환경 악화 등이 있으며, 지속적으로 강구조물의 부식에 대한 노출이 심화되면서 유지·보수비용이 증가하고 있다. 이에 따라 유지·보수비용을 절감할 수 있는 공법 및 기술 개발이 요구되고 있다.

강교 도장의 수명 예측에 대한 연구 및 보수도장에

에 관한 연구^{1,2)}에 따르면 도장의 평균 수명은 약 13년 정도이며, 실제 재도장 주기는 10년 정도로 보고되고 있다. 교량수명을 50년이라고 가정한다면 4회 이상의 보수도장 또는 재도장이 필요한 상황이다.

강교의 재도장의 수요가 늘어나고 있지만, 현장에서 재도장 공정 중 표면처리는 아직도 인력 위주로 진행되고 있다. 협소한 공간에서 작업자가 그라인더 등의 전동 공구를 이용하여 표면처리를 진행하는데, 이로 인하여 작업자들의 안전사고가 지속적으로 발생하고 있다. 최근에서야 표면처리가 우수한 PS볼을 활용한 블라스팅을 하고 있지만, 미세먼지가 대량으로 발생하여 작업자의 작업환경이 열악한 상황이다.

본 연구에서는 임펠라 블라스트(impellar blast) 장비를 활용한 효율적인 표면처리 기법을 개발한다. 임펠라 블라스트는 고속으로 스틸볼을 분사하여 피도면에 충돌하며, 충격에너지로 피도면의 기존 도장막 또는 이물질질을 제거한다³⁾. 본 연구에서는 충격에너지와 관계있는 스틸볼(steel ball)의 크기, 임펠라의 회전 속도, 노출시간의 상관관계를 분석하여 표면처리 작업의 효율을 향상하고, 이후 개발된 표면처리 기술을 바탕으로 임펠라 블라스트를 이동 가능한 로봇에 장착하여 자동으로 표면처리가 가능한 장비⁴⁾를 개발하고자 한다.

* Corresponding author: gobhwd@daum.net

1 Jire High Tech E&C, #510, Leaders Bldg, 42 Jangmi-ro Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13496, Korea

2 Korea Constructions Equipment Technology Institute

3 FM Global Corporation

Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 관련 연구

2.1 철의 부식과 강교의 수명

강교에서 주로 발생하는 문제는 철의 부식으로, 거울에 사용하는 제설제로 인하여 강교에 비래염분이 부착되어 표면이 산성화되면서 부식반응을 촉진시키고 있다. 철강 재료는 1%가 표면 부식되면 강도는 5~10% 감소하고, 양면으로 표면부식이 5%가 발생하게 되면 그 강재를 사용할 수 없다.¹⁾

또한, 도장의 방청효과는 도막이 강재면에 밀착하고 있는 정도에 따라 영향을 받는다. 강재면과 도막 사이에 녹, 흑피, 열화도막, 공기, 물 염분 등의 이물질이 있는 경우, 도료의 방청효과가 떨어지고, 발청이 촉진되어 강재에 녹이 발생한다.

녹이 발생되면 부피가 증가되어 도막의 미세 들뜸 현상이 일어나 도막이 박리되면서 물과 공기가 스며들어 도막이 팽창한다. 팽창한 도막의 미세 들뜸이 발생하게 되면, 발청 및 도막열화가 촉진되어 진다. 강교에서 녹은 강교의 도막 상태를 불량하게 하고, 강교의 공용수명이 급격히 감소시킨다고 볼 수 있다¹⁾.

2.2 강교의 표면처리

정영수의 강교량 보수도장공사에 관련한 연구⁵⁾에서 보수도장은 신설도장보다 내구성이 현저히 감소하며, 수공구로 표면처리 시에는 보수도장의 내구성이 신설도장에 비해 75% 감소하고, 동력 공구는 58% 감소하는 것으로 나타난다고 하였다. 윤한기 연구⁶⁾에서는 알루미늄 판재의 샌딩 조건에 따른 도장 특성 평가에서 도막 두께는 연마 공정에서 만들어지는 알루미늄 판재의 표면조도 영향을 받았으며, 연마지를 순차적으로 적용한 결과 #400 연마지로 마무리 할 때 가장 우수한 도장성을 얻는다고 하였다.

기존 연구에서는 재료의 강도 및 연마 공정에 따른 표면조도 등의 연구 등은 진행되어 왔으나 강교에서 사용되는 임펠라 블라스트에 관련한 연구는 진행되지 않고 있다.

3. 실험 개요 및 조건

3.1 실험개요

도장 도료는 일반적으로 표면처리면의 표면조도(surface roughness)가 기준 미만 시 도장에 대한 접촉

면적이 작아져 도막의 물리적 부착효과가 떨어지게 된다. 반대로 표면조도가 기준 초과하는 경우에는 도막이 커버하지 못한 표면 조도의 피크(peak)부분에서 부식이 발생하여 도막 박리가 발생할 수 있다. 따라서 강교량 도장공사 시방서(KCS 14.31.40 : 2019 도장)는 원판의 표면처리 조도를 25~75 μ m로 규정하고 있다.⁷⁾

본 연구에서는 강교 하부의 표면처리를 모사하기 위해 시편인 강판과 임펠라 블라스트 장치를 이용하였다. 임펠라 블라스팅 시 다양한 직경의 스틸볼과 회전속도에 따른 표면 조도를 측정하여 기준 만족 여부를 확인하고, 블라스팅 노출 시간에 따른 유효면적을 확인하였다. 측정 결과를 통해 강교 표면처리 시 적용할 임펠라 블라스트에 맞는 최적의 스틸볼, 회전속도 및 노출시간을 선정하고자 한다.

3.2 실험장비 구성 및 재료의 제원

강교 하부의 표면처리를 모사하기 위한 시험 장비는 Fig.1에서 보는 것과 같이 임펠라 블라스트 장비, 제어 판넬, 무선리모콘으로 구성 되어 있다.

임펠라 블라스트 장비의 모터 제원은 Table 1에서 보는 것과 같으며, 임펠라가 회전하면서 원심력에 의해 스틸볼을 밀어내 투사하여 강판을 타격하면서 도장면의 도막이 제거되는 원리로 Fig. 2는 임펠라 블라스트의 구조를 보여준다. 제어판넬은 임펠라 블라스트 장비의 회전 속도를 조절할 수 있다.

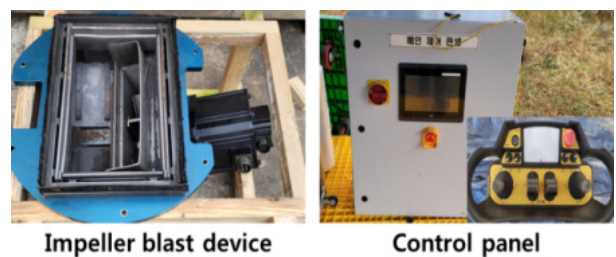


Fig. 1 Impeller blast and control panel

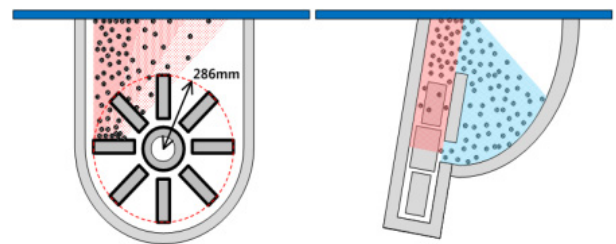


Fig. 2 Movement of Steel ball in Impeller blast

Table 1 Servo motor specification

Rated output (kW)	5
Rated torque (N·M)	15.92
Maximum torque (N·M)	39.79
Rated rotation speed (r/min)	3,000
Maximum rotation speed (r/min)	5,000
Weight (kg)	17.7

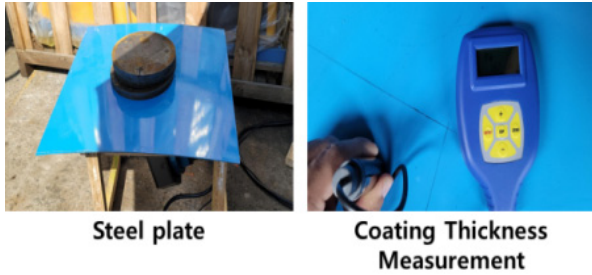


Fig. 3 Steel plate and thickness measurement

Table 2 Result of thickness measurement

Item	Measurement number (unit : μm)					Average (μm)
	1	2	3	4	5	
Paint thickness	216	204	177	177	175	189.8

※ 강교량 외부 추천 도막 두께 : 215 μm , 허용오차 : 최소160 μm ~ 최대275 μm

실험에 사용 되어질 시편의 경우, Fig. 3에서 보는 것과 같이 가로 1000mm, 세로 1000mm, 두께 3mm의 강판으로 이루어져 있으며, 강판 표면에 하도, 중도, 상도를 적용한 중방식 도장을 하였다.

도막 두께 0~1000 μm 을 측정할 수 있는 디지털 측정장비(ETA-068F)를 활용하여 도막 두께를 측정하였으며, 도막 두께가 우레탄 중방식 도장의 도막 두께 범위 안에 있는 것을 확인하였다(Table 2).

스틸볼의 경우에는 직경이 각각 2.0mm, 1.0mm, 0.6mm인 3종류를 적용하였다. 일반적으로 스틸볼의 사용용도 및 특징으로는 직경 0.6mm의 경우는 동합금주물, 박판, 스텐레스판 등의 탈사, 스케일제거, 스틸 쇼트피닝에 적용되며, 직경 1.0mm, 2.0mm의 경우에는 주로 중대형 주물, 철강, 가단주철, Billet, 강판, 단조품, 열처리품 등의 탈사, 스케일 제거에 주로 쓰인다. 시험에 사용하고자 하는 스틸볼에 대한 제원은 Table 3에서 보는 것과 같다.

Table 3 A specification for a still ball

Specific gravity	7.40g/cm ³	
Hardness	HRC 56~60	
Chemical ingredients	Carbon	0.85~1.20%
	Manganese	0.50~1.20%
	Silicon	0.40~1.50%
	Phosphorous	0.05%이하
	Sulfur	0.05%이하

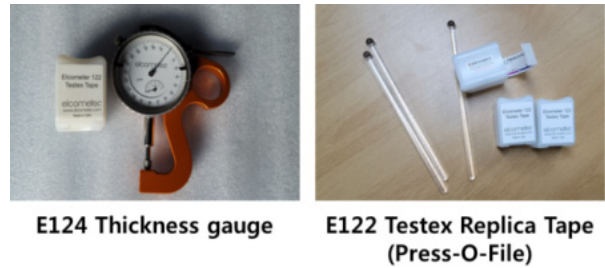


Fig. 4 Thickness measurement device

Fig. 4에서 보는 것과 같이 표면 조도는 E122 Testex Replica Tape(Press-O-File)와 E124 Thickness gauge를 이용하여 측정하였다. 측정 원리는 표면처리한 표면의 조도(Peak-to-Valley Profile)를 테이프의 폼(foam)에 영구적으로 몰딩하여 E124 Thickness gauge를 사용해 측정하고, 측정된 값에 50 μm 를 빼서 조도값을 측정할 수 있다. 본 실험에서 사용한 Tape의 측정 범위는 38 μm ~115 μm 이다.

3.3 실험 조건

스틸볼이 재료 표면에 투사 시 충돌에너지(KE)는 식 1과 같다.

$$KE = 0.5m V^2 \quad (1)$$

여기서, m 은 스틸볼의 질량, V 는 스틸볼의 투사속도를 나타낸다.

스틸볼의 질량은 밀도와 체적에 의해 결정되며, 속도는 휠의 속도, 쇼트볼의 유동율에 의존하므로 스틸볼의 투사시의 운동에너지의 변화는 질량과 속도에서 영향을 받는다. 따라서, 동일한 재질 및 모양의 스틸볼을 사용하는 본 실험에서 스틸볼의 직경과 속도를 변수로 하였다.

Table 4 에서 보는 것과 같이 개발 장비인 임펠라 블라스트를 이용하여 스틸볼 직경, 임펠라 회전 속도를 달리하여 30초간 표면처리를 한 후 표면 조도와 유효면적을 측정한다.

Table 4 Surface roughness test

Sample name	Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Exposure time (sec)
A2000	2.0	2000	30
A2500		2500	
A3000		3000	
B2000	1.0	2000	
B2500		2500	
B3000		3000	
C2000	0.6	2000	
C2500		2500	
C3000		3000	

Table 5 Effective area test

Condition	Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Exposure time (sec)
A8.5	2.0	3000	8.5
A7.0			7.0
A5.5			5.5
A4.0			4.0
B8.5	1.0	3000	8.5
B7.0			7.0
B5.5			5.5
B4.0			4.0
C8.5	0.6	3000	8.5
C7.0			7.0
C5.5			5.5
C4.0			4.0

표면 처리된 강판의 표면조도가 기준에 만족하는 조건 중 가장 큰 유효면적에 해당하는 임펠라 회전 속도로 고정하고, 표면처리 작업 속도를 결정하는 요소인 불의 크기와 노출시간을 변수로 하여 표면처리 후 유효 면적을 확인하여 최적의 작업 조건을 제시하고자 하며 이에 대한 조건은 Table 5에서 보는 것과 같다.

3.4 실험방법

실제 강교 현장에서 작업하는 것과 같은 조건을 모사하기 위해 임펠라 블라스트 장치를 거치할 수 있는 목재틀을 제작하였다(Fig. 5). 목재틀 내부에 임펠라 블라스트 장비를 거치하였고, 임펠라 블라스트 내부에 적용하고자 하는 실험 조건에 맞는 스틸볼을 12kg를 넣어 시험을 진행하였다.



Fig. 5 Installation of impeller blasts



Fig. 6 Impeller blasting test

이 후 Fig. 6에서 보는 것과 같이 해당 실험 조건 데이터를 제어 패널에 설정한 후 장비 상부에 도장된 3mm 강판을 올려놓은 후, 13.6kg 무게의 철제 원판을 3개 올려놓아서 강판이 거동하지 않도록 고정시켰다. 이후 무선리모콘으로 임펠라 블라스트를 작동시켜 블라스팅을 진행하였다. 시험이 끝난 후에는 표면처리가 진행되지 않은 강판부분을 위치 조정하여 다음 시험을 진행하였다.

시험 종료 후 표면 처리된 강판 면에 E122 Testex Replica Tape(Press-O-File)를 상부 하부 각각 1개씩 부착하였다(Fig. 7). 그리고 테이프의 표면조도 측정부를 압착하여 누른 후 테이프를 떼어내어 영점 조정된 E124 Thickness gauge를 사용해 다이얼게이지에 있는 눈금을 확인한 값에 50μm 빼서 정확한 표면조도 값을 산정하였다.



Fig. 7 Surface roughness test



Fig. 8 Film composition on the surface

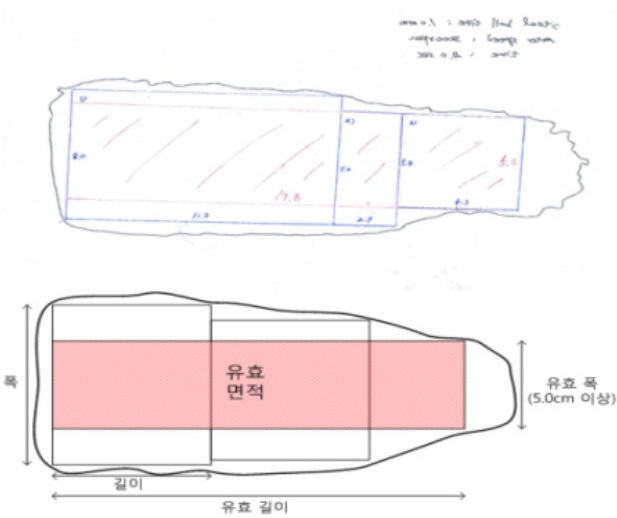


Fig. 9 Calculate the effective area

Fig. 8에서 보는 것과 같이 최적의 유효단면적을 산정하기 위해 투명 PVC필름을 강판 표면에 부착 후, 표면 처리된 면을 따라 작도를 하였다. 작도된 표면처리면 내에 폭 5cm이상을 만족하는 다수의 사각형을 작도한 후 Fig. 9에서 보는 것과 같이 사각형의 길이를 누계하여 유효길이로 하였고 폭은 누계된 마지막 사각형의 폭을 적용하여 이중 가장 큰 면적을 가지고 있는 면적을 유효면적으로 정의하여 분석하였다.

4. 실험 결과

3.1 스틸볼 직경과 블라스트 속도에 따른 조도의 상관관계 분석

Fig. 10과 Table 6은 직경 0.6mm, 1.0mm, 2.0mm의 스틸볼을 임펠라 블라스트를 이용하여 2000rpm, 2500rpm, 3000rpm의 회전속도를 적용하여 30초간 표면처리한 후의 표면조도를 나타내고 있다. 시험 결과 모든 조건에서 표면조도 기준인 25~75 μ m를 모두 만족하였다.

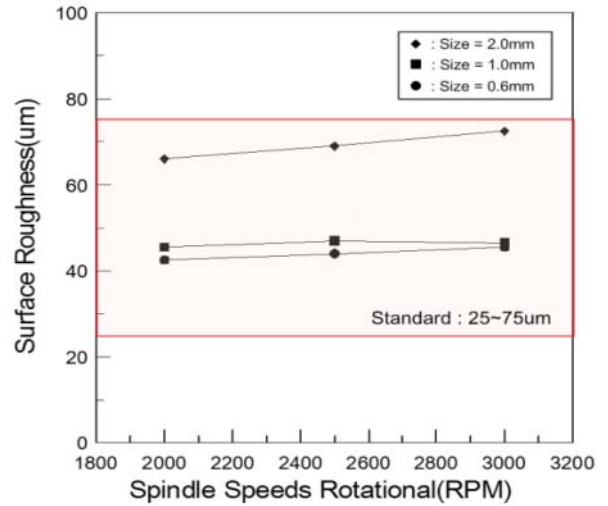


Fig. 10 Changes in surface roughness according to the impella blast rotation speed and steel ball size

Table 6 Result of surface roughness test

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Surface roughness		
		Bottom	Top	Average
2.0	3000	75	70	72.5
	2500	70	68	69
	2000	67	65	66
1.0	3000	45	48	46.5
	2500	44	50	47
	2000	42	49	45.5
0.6	3000	46	45	45.5
	2500	43	45	44
	2000	41	44	42.5

스틸볼 직경의 크기에 따른 표면조도 상승에 대한 분석에서 회전속도 2500rpm시 2.0mm 직경의 스틸볼은 각각 1.0mm, 0.6mm 직경의 스틸볼보다 조도 기준으로 각각 56.8%, 46.8% 상승하는 것을 확인 했으며 1.0mm과 0.6mm 직경의 스틸볼 간의 비교에서는 1.0mm직경의 스틸볼이 6.8% 표면조도가 상승하는 것을 확인하였다.

회전속도 증가에 따른 표면조도 상승률에 대한 분석에서는 직경 0.6mm 스틸볼의 회전속도를 500rpm 증가시 표면조도가 약 1.5 μ m 상승하는 반면, 직경 2.0mm 스틸볼의 경우에는 표면조도가 약 3.0 μ m 편차로 상승을 확인하였다. 따라서, 표면조도는 스틸볼의 직경이 커질수록, 임펠라의 회전속도가 빨라질수록 표면조도가 상승하는 것을 확인하였다.

Table 7 Ratio of surface roughness according to Spindle speeds rotational

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Surface roughness	Rate	Remark
2.0	3000	72.5	1	B.M
	2500	69	0.95	
	2000	66	0.91	
1.0	3000	46.5	1	B.M
	2500	47	1.01	
	2000	45.5	0.98	
0.6	3000	45.5	1	B.M
	2500	44	0.97	
	2000	42.5	0.93	

Table 8 Ratio of surface roughness according to Steel ball size

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Surface roughness	Rate	Remark
3000	2.0	72.5	1	B.M
	1.0	46.5	0.64	
	0.6	45.5	0.63	
2500	2.0	69	1	B.M
	1.0	47	0.68	
	0.6	44	0.64	
2000	2.0	66	1	B.M
	1.0	45.5	0.69	
	0.6	42.5	0.64	

Table 7, 8은 회전속도와 스틸볼 직경에 따라 표면 조도에 미치는 영향을 비율로 나타냈으며 스틸볼 직경이 회전속도에 의한 영향보다 더 크게 나타났다. 이는 표면조도는 임펠라의 회전속도 보다 볼 크기에 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다.

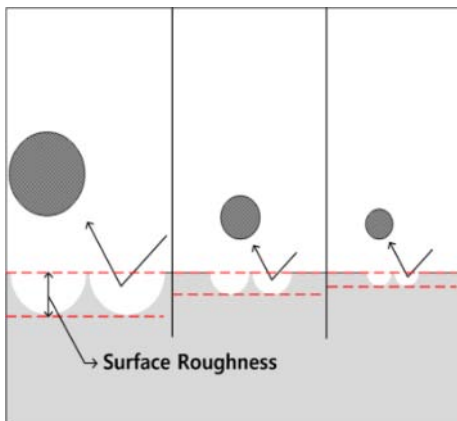


Fig. 11 A schematic diagram of a steel ball collision with a steel plate

Table 9 Result of effective area according to changed Spindle speeds rotational

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Effective area(cm ²)
2.0	3000	292
	2500	224
	2000	170
1.0	3000	155
	2500	189
	2000	104
0.6	3000	166
	2500	113
	2000	59

Fig. 11는 볼의 크기에 따른 조도 변화를 도식한 것이다. 다만 직경 2.0mm에서 표면조도 최대치는 시방기준 최대값 75 μ m로 측정되었다.

임펠라의 회전 속도와 유효면적을 비교한 결과는 Table 9와 같으며, 회전 속도가 높을수록 전반적으로 유효 면적이 증가하는 것으로 나타났다.

4.2 임펠라 블라스트 노출시간에 따른 유효 면적의 상관관계 분석

Fig. 12과 Table 10은 직경 0.6mm, 1.0mm, 2.0mm의 스틸볼을 회전속도 3000rpm으로 도장된 강판에 노출 시간 변화를 주어 임펠라 블라스팅을 하여 유효 면적을 측정된 결과를 보여주고 있다. 측정 결과에서 노출시간이 증가함에 따라 스틸볼 직경과 관계없이 표면처리 면적이 증가하는 경향을 확인할 수 있었고, 직경 2.0mm의 스틸볼이 가장 큰 유효 면적의 표면처리가 가능함을 확인할 수 있었다.

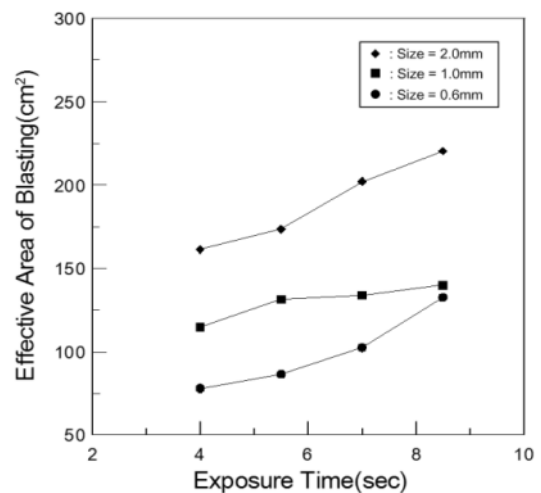


Fig. 12 Changes in effective area according to exposure time.

Table 10 Result of effective area test

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Exposure time (sec)	Effective area (cm ²)	Effective width (cm)	Effective length (cm)
2.0	3000	8.5	220.32	7.2	30.6
		7.0	202.15	6.5	31.1
		5.5	173.46	5.9	29.4
		4.0	161.28	5.6	28.8
1.0	3000	8.5	139.86	6.3	22.2
		7.0	133.76	6.4	20.9
		5.5	131.48	7.6	17.3
		4.0	114.84	5.8	19.8
0.6	3000	8.5	132.6	6.8	19.5
		7.0	102.44	5.2	19.7
		5.5	86.4	6	14.4
		4.0	78.1	5.5	14.2

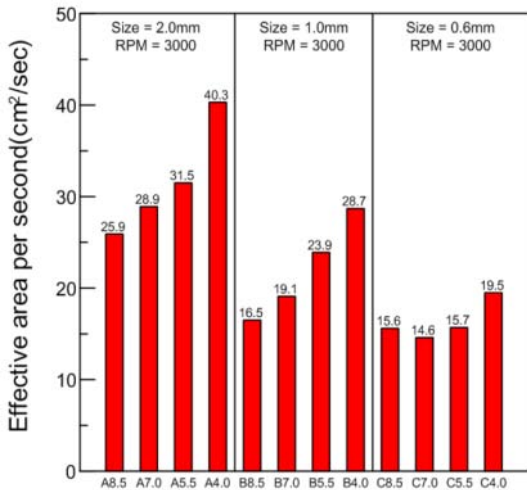


Fig. 13 Effective area per second depending on the diameter and exposure time of the steel ball

Table 11 Result of effective area test

Diameter (mm)	Rotation speed (rpm)	Exposure time (sec)	Effective area per second (cm ² /sec)
2.0	3000	8.5	25.9
		7.0	28.9
		5.5	31.5
		4.0	40.3
1.0	3000	8.5	16.5
		7.0	19.1
		5.5	23.9
		4.0	28.7
0.6	3000	8.5	15.6
		7.0	14.6
		5.5	15.7
		4.0	19.5

또한, Fig. 13과 Table 11에서 보는 것과 같이 초당 표면처리가 가능한 유효면적의 비교 분석에서는 스틸볼 직경 2.0mm, 회전속도 3000RPM, 노출시간 4초인 경우가 초당 유효면적 40.3cm²/sec로 가장 크게 나타나 빠르게 표면처리가 가능한 조건임을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 현재 개발 중인 임펠라 블라스트 장비를 이용하여 스틸볼의 직경, 임펠라 회전속도 및 노출시간을 변경하여 최적의 표면처리 조건을 확인하였다.

첫째, 표면 조도는 볼의 크기와 속도가 클수록 표면 조도 증가하며, 볼의 속도 보다는 크기에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 실험에서 수행한 스틸볼 직경 2.0mm, 1.0mm, 0.6mm 모두 기준을 만족하였으나, 직경 2.0mm의 스틸볼의 경우 최대 75 μ m으로 기준인 75 μ m에 근접하여, 이보다 큰 직경의 스틸볼 사용 시에는 표면조도 기준을 만족하지 못할 것으로 판단된다.

둘째, 임펠라의 회전 속도와 볼의 크기가 클수록 유효면적이 증가하는 것으로 나타났다.

셋째, 임펠라 블라스팅 노출시간이 커질수록 스틸볼 직경에 관계없이 유효면적은 증가하였으나, 작업 효율 노출시간의 관계를 분석한 초당 유효면적에서는, 스틸볼 직경 2.0mm, 임펠라 회전속도 3000rpm, 노출시간 4sec의 조건에서 유효면적이 가장 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업 지원에 의해 수행됨(과제번호: 19CTAP-C15073-01)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음

References

1) C. Y. Lee and T. S. Chang, "Coating Systems and Surface Preparation for Maintenance Coating of Steel Bridge," Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.27, No.2, pp.7-10, 2015.

- 2) C. Y. Lee, H. M. Cheong and J. H. Park, "Prediction of Lifetime of Steel Bridge Coating on Highway for Effective Maintenance," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.28, No.3A, pp.341-347, 2008.
- 3) S. K. Cheong, S. H. Lee and S. C. Chung, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.25, No.10, pp. 1590-1596, 2001.
- 4) M. K. Seo, H. Y. Lee, I. H. Park and B. H. Chang, "Development of a Prototype Monitoring Module for Steel Bridge Repainting Robots," Journal of Drive and Control, Vol.17, No.4, pp.15-22, 2020.
- 5) Y. S. Jeong, Y. B. Kim, G. H. Kim and I. T. Kim, "Investigation for Coating Deterioration by Hand and Power Tool Surface Preparation under Steel Bridge Re-Coating," The Korean Society of Steel Construction, pp.177-178, 2020.
- 6) H. K. Yoon, S. I. Choi and J. H. Lee, "The Characteristics of Painted Coating on Aluminum Sheet by Sending Conditions," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol.25, No.1, pp.44-48, 2011.
- 7) Korea Construction Specifications-Structure Materials Work KCS 14.31.40, pp.9-21, 2019, <https://www.kcsc.re.kr/StandardCode/Viewer/426>.