

강교량 도장열화에 따른 백아화 평가와 상태평가 방법

하민균¹ · 권태윤¹ · 김련학² · 안진희^{3*}

¹박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ²석사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ³교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

Methods of Condition Evaluation and Assessment for Paint Chalking of Steel Bridge Depending on Paint Coating Deterioration

Ha, Min-Gyun¹, Kwon, Tae-Yun¹, Kim, Ryeon-Hak², Ahn, Jin-Hee^{3*}

¹Graduate student(Ph.D course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

²Graduate student(Master course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

³Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

Abstract - In this study, to analyze the paint chalking and condition evaluation methods of the steel bridges, 20 public steel bridges were selected and the color difference, paint chalking, and coating thickness were measured. The color difference was measured using a colorimeter, and the grades of paint chalking were evaluated using the tape method and standard photos. The paint coating thickness before and after removing the paint chalking was measured to evaluate the reduction of the paint coating thickness depending on the paint chalking level. From a result of color difference analysis, it was confirmed that a relative color difference occurred depending on the color of the paint type, and it was found that white paint showed color difference even if paint chalking occurred. In addition, it was confirmed that the reduction in paint coating thickness may be relative depending on the level of paint chalking or relative deviation. Furthermore, as a method to simplify the evaluation process of paint chalking, a machine learning model that can evaluate its grade using only photographic images was analyzed by CNN(Convolutional Neural Network).

Keywords - Steel bridge, Paint chalking, Color difference, Paint coating thickness, Machine learning

1. 서론

강구조물은 상대습도, 비래염분, 온도 및 염화물 등의 영향으로 강부재 표면에 부식열화가 발생하게 되며, 부식열화로 인하여 내구성성이 저하되게 되면 강구조물의 구조적 성능 또한 저하될 수 있다. 일반적으로 강구조물의 부식열화를 방지하기 위하여 강재표면을 도장을 통하여 보호하고 있다^{[1]-[3]}. 도장은 강재표면에 하도, 중도, 상도층의 도료를 도포하여 도막을 형성함으로써 외부의 부식환경인자를 차단하는 방식 방법이다^[4]. 하

지만 도장의 경우 도장 시공자나 현장 조건 등에 따라 시공수준의 차이가 나타날 수 있으므로 시공수준에 따라 도막의 수명변화와 국부적인 도장열화가 나타날 수 있다^{[5],[6]}.

현재 국내에서는 강구조물의 도장에 관한 열화평가 및 유지관리를 위하여 강교량의 도장 내구성능 평가 세 부지침을 제시하고 있다^[7]. 세부지침에서는 도장열화의 평가 항목을 발청(표면부식), 도장 박리, 균열, 부품, 변색 및 백아화로 구분하고 있으며, 열화면적이나 표준 사진 등을 참고하여 육안으로 평가지표의 등급을 측정할 수 있도록 하고 있다. 이 중 백아화는 자외선 등에 의하여 도막표면이 분해되고 분말화되는 현상으로 도막의 색을 옅어지게 만들고 안료 성능을 저하시키는 도장열화 현상이다^[8]. 백아화는 도장의 광택 감소와 함께 나타나는 열화현상으로, 백아화가 발생한 경우 상도나 중도 도막두께의 감소가 나타날 수 있다. 현재 발청, 박리, 균열, 부품 평가기준은 발생 면적 비율을 평가하여 정

Note.-Discussion open until August 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 08, 2023; revised on December 22, 2023; approved on December 22, 2023.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209

E-mail. jahn@gnu.ac.kr

량적으로 등급을 평가하는 기준이 마련되어 있으나, 변색 및 백아화 평가의 경우 변색과 백아화의 수준을 셀로판 테이프를 이용하여 평가하거나 육안에 의존한 정성적인 평가방법을 제시하고 있다^[8]. 육안 및 테이프에 의한 변색 및 백아화 평가 방법의 경우 점검자의 주관적 판단에 의존하게 되므로, 동일한 교량에서도 변색 및 백아화의 평가 등급이 점검자의 주관적인 기준이나 전문성, 검사조건 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 분말화된 도막 상태를 정량적으로 평가하고 백아화 수준에 따른 도장두께의 변화를 분석하거나 백아화를 정량적으로 확인하기 위한 방법의 검토가 필요하다.

부식환경에 따른 도장열화에 관한 연구로 도장계의 종류에 따른 임계 비레오펜량을 분석하고 부식속도를 평가하는 연구가 진행되었으며, 촉진 실험과 현장실험을 통하여 도막 열화수준을 평가하고, 도장계 종류에 따른 강교량의 도막의 수명을 예측하는 연구가 진행되었다^{[9],[10]}. 온도 영향에 따른 도장손상과 관련하여 강교량의 화재 시 화재현상에서 도장계별로 표면상태 변화로부터 수열온도를 추정하는 연구가 진행되었다^{[11],[12]}. 또한, 도막두께에 따른 차열 성능 및 발열 균일도 등을 분석하여 최적의 도막두께를 결정하는 연구가 진행되었으며^[13], 고온에 도장을 노출시키는 촉진실험을 진행하여 도장열화가 발생하는 임계 온도를 파악하고 도장 성능을 정량적으로 평가하는 연구가 진행되었다^[14].

도장 광택, 백아화, 도장두께에 관련된 연구로는 국외에서는 옥외노출실험을 실시하여 도장의 종류에 따른 광택보유율과 백아화를 평가하고 도장두께 감소량을 평가한 사례가 있다^[15]. 도장계별 광택 보유율 평가 결과, 노출기간 250개월이 경과하여도 광택이 완벽하게 소멸되지는 않는 것을 확인하였다. 백아화 평가 결과, 광택 보유율 감소 경향과 유사하게 노출기간 약 170개월이 경과하면 백아화 평가점수가 0점으로 평가되었다. 도장두께 감소량 평가 결과, 도막두께 감소량은 연평균 약 $0.7 \mu\text{m}$ 수준인 것으로 평가되었다. 또한, 불소계 도장에서는 노출기간 250개월까지 약 30%의 광택을 보유하고 있는 것을 확인하였으며, 백아화가 전혀 발생하지 않는 것을 확인하였다. 국내에서는 촉진내후성시험을 실시하여 백아화 발생 정도를 KS M ISO 4628-6에 따라 평가한 사례가 있으며, 같은 촉진실험을 진행하여도 도장계에 따라 백아화 등급이 상대적인 것

을 확인하였다^[10].

도장열화 및 백아화 평가와 관련된 이전 연구들에서는 실제 교량이 아닌 실내촉진실험을 통하여 도막열화를 도장의 종류별로 평가하거나 도장의 수명을 예측하는 연구들과 환경조건이나 온도변화를 고려한 도장열화 수준을 평가하고 도장 성능을 파악하는 연구만이 진행되었다. 하지만, 실제 사용 중인 강교량 부재를 대상으로 도장열화 지표 중 백아화 상태만을 정량적으로 평가하고, 이와 연계하여 도막두께나 색차의 변화 등을 평가한 연구는 진행되지 않은 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 강교량 부재의 도막 색상변화와 도막두께 감소량을 백아화 수준과 비교하여 도장의 상태를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 백아화가 발생한 강교량을 조사하여 20개의 측정 대상 강교량을 선정하고, 색차계를 활용하여 백아화 제거 전후의 색상을 비교하였다. 또한, 도막두께측정기를 활용하여 백아화 제거 전후의 도막두께 변화를 측정하여 도장변색과 도장두께를 백아화 수준과 연계하여 분석하고자 하였다. 교량의 초기 도장두께는 명확히 알 수 없으므로, 백아화 발생에 따른 도장두께 변화를 평가하기 위하여 백아화 분말 제거 전과 후의 도장두께를 측정하고 비교하였다. 추가적으로, 백아화의 평가 등급이 점검자의 주관적인 기준이나 전문성에 영향을 받을 수 있으므로 백아화 등급을 정량적으로 평가하고, 평가 과정을 간소화하기 위한 방법으로 강교량의 백아화 상태를 외관 이미지로 분석할 수 있는 머신러닝 기법의 적용성을 분석하였다.

2. 도막 열화에 따른 백아화 평가

2.1 백아화 측정 대상 교량 및 측정 방법

강교량 도장 백아화에 따른 색차, 도장두께 변화 등을 평가하기 위하여 백아화가 발생한 공용 중 교량의 외관상태를 조사하였다. 본 연구에서는 백아화가 발생한 총 20개 강교량을 대상으로 하였다. 대상 교량들은 공용 중인 강박스 거더교 형식의 고속도로 및 국도상 도로교로 선정하였다. 또한, 도장계에 따라 최초 색상과 변색된 색차 수준이 변화할 수 있으며, 도장두께의 상대적인 차이가 있을 수 있으므로 백아화 상태 평가 과정에서 도장색상, 공용연수, 재도장 상태를 확인하고

최초 도장으로 판단되는 부분을 대상으로 측정하였다. 또한, 도장두께에 대한 특성을 파악하기 위하여 최초 도장된 신규 강거더의 도장두께를 측정하여 도장두께의 분포 특성 등을 파악하였다.

백아화 현상은 습도, 비래염분, 대기오염 등에 영향을 받아 발생하는 부식열화와는 달리 자외선 등에 영향을 받으므로 교량의 일조량에 영향을 받을 수 있다. 따라서, Fig. 1과 같이 강교량 내에서 백아화 측정위치를 햇빛에 노출되어 있는 거더의 외측과 상대적으로 그늘에 위치한 거더 내측으로 구분하였다. 본 연구의 측정 대상 교량들은 현재 공용 중인 교량이며, 부재 표면에 먼지, 거미줄 등의 이물질로 인하여 도장두께나 색차의 측정 결과에 영향을 줄 수 있으므로, 측정 전 이러한 요소들을 제거한 후 측정을 진행하였다. Fig. 1에 색차 측정 위치, 도장두께 측정 방법 및 테이프법을 활용한 백아화 등급 평가 절차를 정리하여 나타내었다.

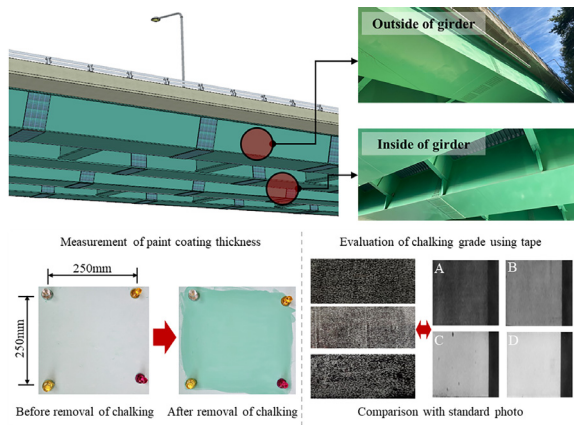


Fig. 1. Measurement location of steel bridge girder and test methods

2.2 실험 방법

2.2.1 색차 측정

백아화로 인하여 나타나는 도장의 색차를 측정하기 위하여 본 연구에서는 SC-80 색차계를 활용하였다. SC-80 색차계는 측정 위치의 특정 파장을 흡수 또는 반사하면서 발현되는 가시광선에 의하여 빛이 반사되거나 투과되는 비율을 측정하는 원리로 색상을 측정하고, 국제적으로 규격화된 수치로 색상을 평가할 수 있다. CIE $L^*a^*b^*$ 는 1976년 국제조명위원회(CIE)에서 색상을 구체적인 수치로 규격화한 것으로 물체의 색을 표현하기 위

하여 가장 일반적으로 사용되고 있다. L^* 는 명도, a^* 는 (+)값이 클수록 빨강, (-)값이 클수록 녹색, b^* 는 (+)값이 클수록 노랑, (-)값이 클수록 파랑색으로 가까워진다.

색차변화는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 강거더의 복부를 대상으로 25×25 mm 면적에 대하여 증류수로 이물질만을 제거 후 백아화만 남아 있는 상태에서 1회, 백아화 분말을 완벽히 제거한 후 1회 측정하였으며, 백아화 제거 전의 색상을 기준으로 제거 후의 색상 변화 수준을 평가하였다. 정량적인 색차는 식 (1)을 활용하여 면적당 L^* , a^* , b^* 의 평균을 각각 계산하고 백아화 분말의 제거 전의 결과값과 제거 후의 결과값의 차이로 색차 ΔE^* 를 도출하였다^[16].

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

2.2.2 백아화 측정

KS M ISO 4628-6에 규정되어 있는 테이프법은 백아화 수준을 평가할 수 있는 방법으로 측정용 테이프는 일반적으로 상업용으로 공급되는 광택이 낮으며 육안으로 확인할 수 있는 색상이 없는 투명한 테이프를 활용하며, 테이프의 규격은 폭 15 mm 이상, 길이 40 mm 이상을 사용하도록 규정하고 있다^[8]. 테이프를 활용한 백아화의 구체적인 평가 절차는 측정하고자 하는 도장 표면에 테이프를 부착한 후 테이프에 백아화 분말이 충분히 묻을 수 있도록 압력을 가하고 백아화 분말이 충분히 묻은 테이프를 도장표면에서 제거하고 백아화 색상(흰색)과 대비되어 백아화 수준을 확인할 수 있는 색상의 기재 위에 부착하여, 채취된 백아화 분말을 표준 사진과 비교하여 백아화 수준을 평가하게 된다.

본 연구에서는 테이프 규격을 만족할 수 있도록 폭 48 mm, 길이 55 mm 이상의 테이프를 활용하여 백아화를 측정하였으며, 앞서 설명된 절차에 따라 백아화 수준의 평가를 진행하였다. 테이프에 부착된 백아화 수준이 잘 나타날 수 있도록 기재는 검은 종이를 활용하였으며, 표준 사진과 비교하여 각 강교량별 백아화 등급을 검토하였다.

2.2.3 도장두께 측정

국내의 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침에서의 도장두께 평가 방법은 도장두께 측정기를 활용하여 측정하며, 강부재 2~3개소를 대상으로 전체 경간의 25%,

최소 3개 경간 이상을 만족해야 한다고 규정하고 있다^[7]. 또한, SSPC PC2에서는 도막두께 측정 시 약 10 m² 내에서 임의로 5곳을 지정하여 위치마다 약 38 mm 이상 벗어나지 않도록 하여 도막두께를 3회 측정하고 평균값을 도출한 후 도장사양 두께의 80%~120% 범위 내의 값으로 만족하는지 평가하도록 하고 있다^[17].

단일 부재에서도 여러 환경조건 및 가설조건에 의해 위치별 백아화의 발생수준에 차이가 날 수 있으며, 도막두께의 경우에도 측정위치마다 측정값이 상이할 수 있다. 기존에 제시된 방안은 도장의 현재 상태만을 평가하기 위한 방법이며, 도장두께를 효율적으로 관리하기 위하여 기존 대비 도장두께 감소 수준이나 도장두께 감소량을 예측하기엔 어려운 점이 있다. 따라서, 강부재의 설치환경이나 사용기간 등에 따른 도장두께 감소량을 예측하기 위해서는 백아화 발생 수준에 의한 도장두께 감소량을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

도장두께는 시공환경 및 조건 등에 따라 동일한 부재에 실시된 도장이라도 초기 도장두께가 부재의 위치별로 다를 수 있으므로, 도장두께를 특정 부위에 대하여 측정한다면 과도하게 작거나 큰 값이 측정될 수 있다. 따라서, 초기 도장두께와 비교하여 감소된 도장두께를 더욱 정확하게 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타난 것과 같이 측정면적을 25×25 mm로 결정하였으며, 측정면적 내에서 도장두께를 240회 측정하였다. 측정 면적을 명확하게 고려하기 위하여 측정 위치의 폭과 높이를 사전에 확인하였으며, 각 측정단면을 구분하기 위하여 강거더 표면에 자석을 부착하였다. 또한, 백아화 발생 전과 후의 도장두께 감소량을 평가하기 위하여 백아화 제거 전과 후의 도장두께를 각각 240회씩 측정하여 상대적인 편차를 최소화할 수 있도록 하였다. 측정 부재 표면의 이물질은 강박스 거더 표면에 증류수를 흘려 도장두께 측정 시 이물질에 의한 영향이 없도록 하였으며, 백아화 분말은 도막표면의 손상이 발생하지 않도록 증류수를 분사한 후 백아화 분말이 도막에서 완벽히 제거될 때까지 문질러 제거하였다. 이러한 방법으로 측정된 도장두께의 분포 특성을 확인하여 평균적인 도장두께의 변화량을 확인하고자 하였다.

2.3 머신러닝 기법을 이용한 백아화 상태 평가

백아화의 상태평가를 위해서는 점검자가 교량에 직

접 방문하고 점검대차 등을 활용하여 부재에 테이프를 탈부착하는 과정을 반복해야 한다. 이러한 방법은 점검자의 주관에 따라 백아화 평가 등급이 상대적으로 측정되게 되며, 인력소모와 소요시간 등으로 인하여 경제적으로도 비효율적일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 사진촬영만으로 백아화 등급을 평가할 수 있는 방법으로 머신러닝의 적용성을 확인하였으며, 머신러닝 모델로 CNN(Convolutional Neural Network)을 활용하였다. CNN은 영상이나 이미지 학습 데이터를 활용하여 데이터를 처리하는 머신러닝 기법으로, 이미지를 기반으로 교량의 구성요소를 자동으로 분류하는 네트워크나 도로포장 및 콘크리트의 균열을 검출하는 연구 등에 적용되고 있다^{[18]-[20]}. CNN을 이용한 이미지 기반 상태평가 연구와 CNN의 적용성 등을 고려하여 본 연구에서도 도장의 백아화 상태 평가를 위한 머신러닝기법으로 CNN을 적용하였다. 또한, 백아화 상태 평가를 위하여 다양한 CNN 모델 중 VGGNet16을 활용하여 구성하였다^[21]. VGGNet16은 Conv layer 개수가 많고, 크기가 작은 3×3 Filter를 모든 Convolution Layer에 적용하여 상대적으로 좋은 성능을 보유한 모델이다.

본 연구에서 구성된 모델의 구조는 Fig. 2와 같다. 또한, Weight decay는 0.0001로 학습을 진행하였으며 Table 1과 같이 Loss function, Optimizer, Learning rate, Batch size, 그리고 Epoch의 값을 적용하여 학습을 진행하였다. 학습자료로써 사용되는 이미지들은 공장에서 제작된 신규도장과 현재 공용 중인 교량을 촬영한 이미지이며, 이미지의 크기는 256 by 256 화소로 변경하여 학습자료로 활용하였다. 이미지들은 등급별로 분류하였으며 신규도장의 이미지의 경우에는 A등급으로 분류하였고 공용 중인 교량의 이미지는 백아화 표준사

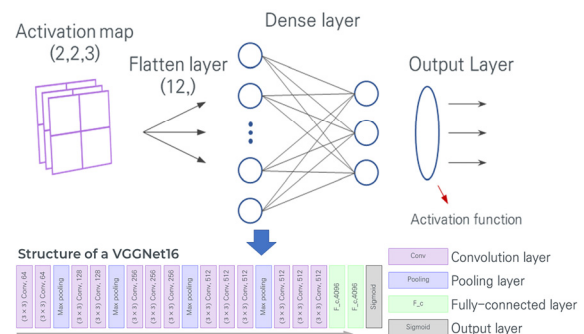


Fig. 2. Structure of a VGGNet16

Table 1. Learning parameter

Learning Parameter	
Batch size	32
Epoch	100
Learning rate	0.001
Optimizer	Adam
Loss function	Binary crossentropy

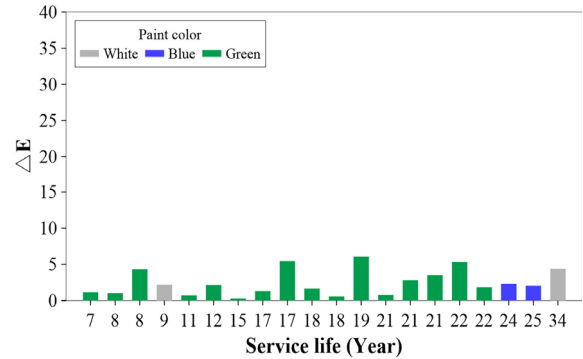
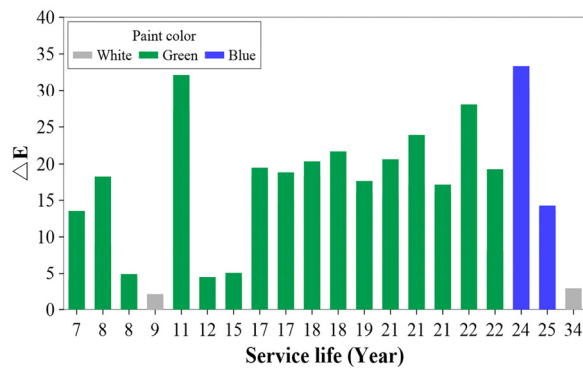
진을 활용하여 이미지상의 백아화 등급을 판단하여 등급별로 분류하였다. 학습자료는 A~D등급 각각 100장으로 총 400장으로 구성되었다. 모델 학습 및 평가를 위해 학습자료들을 Train set, Validation set, Test set으로 구성하였으며 각 Set에 대한 이미지 수의 비율은 6:2:2로 하였다.

3. 백아화 및 도장두께 측정 결과

3.1 색차 측정 결과

강거더 내측과 외측에 대한 색차 측정 결과를 Fig. 3와 Fig. 4에 정리하여 나타내었다. Fig. 3와 Fig. 4에서 심볼 및 막대의 색깔은 측정된 부재의 도장계 색상을 의미하며, 가로축은 측정된 교량의 사용기간을 의미한다. 색차계로 측정된 색차값은 수치가 클수록 색차가 색도가 높다는 것을 의미하며, 작을수록 무채색에 가까워진다. 또한, ΔE 는 값이 클수록 색차가 많다는 것을 의미하며, 값이 작을수록 색차가 적다는 것을 의미한다.

백아화 분말 제거 전후에 따른 강거더 내측의 색차 측정 결과, Fig. 3에 나타낸 것과 같이 초록색 도장의 경우 ΔE 값이 교량에 따라 0.28~6.08 수준으로 측정되는 것을 알 수 있으며, 파랑색 도장과 흰색 도장의 경우 ΔE 값이 2.03~3.98 수준으로 측정되었다. 강거더 외측의 색차변화의 경우, Fig. 4에 나타낸 것과 같이 초록색과 파랑색 도장의 경우 ΔE 값이 4.32~31.80 수준, 흰색 도장에서는 2.16~3.64 수준으로 색차변화가 나타났다. 내측 거더는 햇빛에 의한 영향이 없으며, 외부 대기환경으로부터 상대적으로 덜 영향을 받는 환경에 설치되어 있으므로 사용기간이 증가함에 따라 도장의 초기상태를 잘 유지하여 색차가 적게 나타난 것으로 판단된

**Fig. 3.** Color difference of inside girder**Fig. 4.** Color difference of outside girder

다. 이와 상대적으로 외측 거더는 햇빛에 직접적인 영향을 받아 많은 백아화가 발생하여 초기 색상과 비교하여 상대적으로 큰 색차가 나타났다. 또한, 도장의 색상에 따라 색차가 증가하는 경향은 나타나지 않았다.

색차를 도장의 색상별로 비교하는 경우 Fig. 3와 같이 내측 거더에서는 도장의 색상에 따라 색차 수준의 차이는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 하지만, 외측 거더에서는 Fig. 4와 같이 도장의 색상에 따라 색차의 수준 또한 상이한 것을 확인할 수 있다. 백아화는 도막 표면이 분해되어 흰색으로 분말화되는 현상이므로, 초록색과 파랑색 도장에서는 백아화 발생 전후의 색차가 상대적으로 크고 흰색 도장에서는 색차가 상대적으로 적게 나타난 것을 알 수 있다.

백아화는 강부재 표면에 발생하여 교량의 도장 내구성을 감소시킬 뿐만 아니라 미관까지 저하시킬 수 있다. 흰색 도장계는 백아화가 발생하더라도 색차가 적으며, 백아화 발생 수준을 육안으로 확인하기엔 어려움이 있을 수 있으므로, 흰색 도장계에는 백아화가 발생하는 경우 색차를 활용하여 백아화 등급 평가하기에는 어려

움이 있을 것으로 판단된다. 하지만, 흰색 도장계가 적용된 교량은 도장색상이 하얗게 변색되어 교량의 미관을 저하시키는 효과는 상대적으로 적을 것으로 평가되었다. 따라서 백아화에 따른 도장의 색상변화에 대한 색차 측정 결과를 이용한다면 강교량의 도장색상이나 종류를 선택하는 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.2 백아화 측정 결과

시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침에서는 백아화 등급을 측정하기 위한 표준사진을 A~D등급으로 구분하여 제시되어 있으므로^[7], 본 연구에서는 표준사진을 참고하여 측정 교량들의 백아화 등급을 평가하였다. 본 연구에서는 총 20개 교량을 대상으로 백아화 등급을 측정하였으며, 교량의 공용연수와 백아화 상태를 고려하여 7~19년 공용연수를 가진 강교량의 백아화 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 거더 내측의 백아화 평가 결과, 거더 내측의 백아화 발생 수준은 Table 2와 같이 테이프에 묻어 나오는 백아화량이 거의 없으며, 표준사진과 비교하는 경우 백아화의 평가 등급이 A 등급 수준인 것을 알 수 있다. 거더 외측의 백아화 평가 결과, 거더 내측과는 다르게 테이프 전체에 백아화가 묻어 나오는 것을 확인할 수 있으며, 교량에 따라 상대적인 차이가 있지만 백아화 등급이 표준사진과 비교하는 경우 B~D 등급 수준으로 평가되는 것을 알 수 있다. Table 2

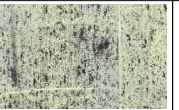
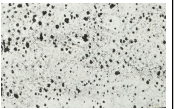
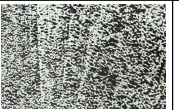
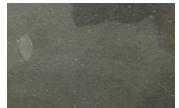
에 모든 측정 결과를 나타내지는 않았지만 본 연구에서 백아화 등급이 측정된 모든 교량에서 Table 2와 같이 거더 내측은 백아화가 거의 발생하지 않아 A 등급 수준, 거더 외측은 B~D 등급 수준으로 평가되었다. 백아화 등급 평가 결과로부터 거더 내측은 백아화가 거의 발생하지 않아 백아화에 의하여 상대적으로 도장의 내구성능이 감소하지 않는 것을 확인하였다. 하지만, 거더 외측의 경우 햇빛 등의 외부 대기환경요인의 영향으로 많은 백아화가 발생하므로 도장의 내구성능이 감소할 수 있으며, 백아화 등급으로 인한 강교량 전체의 내구성능 평가점수에도 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

현재 발청 및 도장열화에 대한 조사 방법으로는 현장 조사 구간을 전체 경간의 25%, 최소 3개 경간 이상에 대하여 전수조사를 실시하는 방법을 적용하고 있다. 이러한 방법을 적용한다면 평가 대상 부재를 거더 내측으로 선정하였을 경우 거더 외측에 많은 백아화가 발생하였음에도 도장열화 내구성능 등급이 A등급 수준으로 평가될 수 있을 것이다. 따라서, 백아화에 대한 내구성능 평가 과정에서는 거더의 외측을 중심으로 현장조사를 실시하여야 할 것이며, 거더 내외측의 백아화 발생 수준이 상대적으로 차이가 나므로, 이에 대한 유지관리 방안 등이 마련되어야 할 것이다. 본 연구에서 백아화 측정 대상 교량들은 공용연수가 7~23년이며, 국외의 백아화 평가 결과와 같이 교량의 공용연수에 따라 거더 외측에서 대부분 C~D 등급 수준으로 평가되었다. 측정 대상 교량들은 국내에 설치되어 있는 강교량을 무작위로 선정하여 백아화를 측정하였으므로, 공용연수만을 파악할 수 있었으며, 도장계의 종류나 구조부재의 설치 방향 등은 명확히 파악할 수 없었다. 도장 백아화는 도장계나 강부재의 설치방향 및 환경 등에 영향을 받아 상대적으로 나타날 수 있으므로, 이를 정확히 파악하고 백아화를 평가한다면 도장계, 설치방향과 백아화 등급을 연계하여 평가할 수 있을 것이다.

3.3 도장두께 측정 결과

백아화는 도막 성분이 분해되어 일어나는 현상으로 분해된 도막이 미세한 분말로 도막 표면에 부착되게 되므로 도장에 백아화가 발생한다면 백아화로 인하여 도장두께가 감소할 수 있다. 따라서, 백아화 분말 제거 전후의 도장두께를 비교하여 백아화에 따른 상대적 도막

Table 2. Measurement results of chalking grade

Service life (Color)	Measurement of film chalking using tape			
	Test results			
	Inside	Grade	Outside	Grade
7 (Green)		A		C~D
11 (Green)		A		D
17 (Green)		A		B~C
19 (Green)		A		D

두께 변화를 판단할 수 있다.

백아화 분말 제거 전후의 도장두께 변화량을 분석하기 위하여 신규 도장의 도장두께를 측정하여 도장두께 표본값들에 대한 정규성 검정을 우선 진행하였다. 신규 도장의 도장두께는 도장 시공회사에 직접 방문하여 최초 도장된 거더를 대상으로 측정하였으며, 2개소를 선정하였다. 확률지는 특정 확률분포와 직접적으로 관련될 수 있도록 만들어지며, 확률분포가 다르면 그에 상응하는 확률지도 달라지게 된다. 확률지는 고려되는 분포의 누적확률과 관련 변량값 사이에 그래프가 직선이 되도록 하는 방식으로 변형된 확률축척을 사용하여 작성된다. 예를 들면 균등분포인 경우에는 누적분포함수는 변량값과 선형적인 관계를 가지므로, 이 분포를 나타내기 위한 확률지는 변량값과 관련 누적확률의 양쪽에 산술축척을 사용하여 작성된다. 하지만, 그 밖의 분포의 경우는 직선 관계를 얻기 위하여 누적확률에 대한 표본값들의 축척이 필요하다. 확률분포 $N(\mu, \sigma)$ 를 갖는 정규변량 X 는 확률지 상 $X = \mu$ 와 $\Phi(S) = 0.50$ 를 지나며 $(x_p - \mu)/s$ 의 구배를 가진 일직선으로 나타내게 된다. 여기서, x_p 는 확률 p 에 대한 변량의 값이다^[22].

신규 도장의 도장두께에 대한 정규성 검정 진행 결과를 Fig. 5에 측정 위치 2개소를 비교하여 나타내었으며, 신규 도장의 도장두께는 정규확률분포를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 강교량 복부 단면에 25×25 mm면적으로 240회의 도장두께를 측정하였으

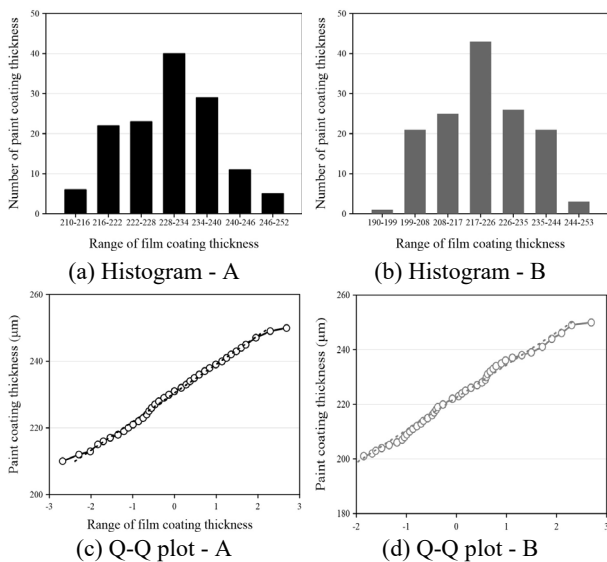


Fig. 5. Normal test of initial paint coating thickness

므로, 표본수가 많아 정규확률분포로 나타난 것으로 판단된다. 따라서, 백아화 분말 제거 전후에 나타나는 두께 변화 특성을 비교하여 측정된 도막 두께의 변화가 측정자에 의하여 나타나는지 백아화 분말 제거에 따른 것인지를 비교할 수 있도록 하였다.

거더 내측에서는 앞서 분석된 결과와 같이 거더 외측과 비교하여 색차 수준도 적었으며, 백아화도 거의 거의 발생하지 않았으므로, 백아화 분말 제거 전후의 도장두께 또한 거의 감소하지 않았다. 따라서, 거더 외측에 대한 백아화 분말 제거 전후 도장두께 변화량을 분석하였으며, 분석 결과를 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 백아화 분말 제거 전후의 도장두께 감소량을 분석한 결과, Fig. 6와 Fig. 7에서 확인할 수 있는 것과 같이 백아화 분말 제거 전후의 도장두께는 모두 정규분포로 나타나는 것을 알 수 있으며, 백아화 분말 제거 후 도장두께가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 대상 20개 교량에서 모든 유사한 형태의 확률분포가 나타났으므로, 대표적으로 2개의 강교량에 대한 도막 두께측정 결과에 대한 분석을 비교하여 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다.

백아화 상태를 분석한 대상교량 전체에 대한 도장두께 변화량을 분석한 결과, 백아화 제거 후의 도장두께를 비교하였을 때 Fig. 8에 나타난 것과 같이 백아화 분말 제거 전후의 도장두께의 차이가 (-)인 교량이 대부분이지만, 교량 1개소에서 도장두께의 차이가 (+)로 나타나는 것을 알 수 있다. 도장두께는 동일 부재 내에서도

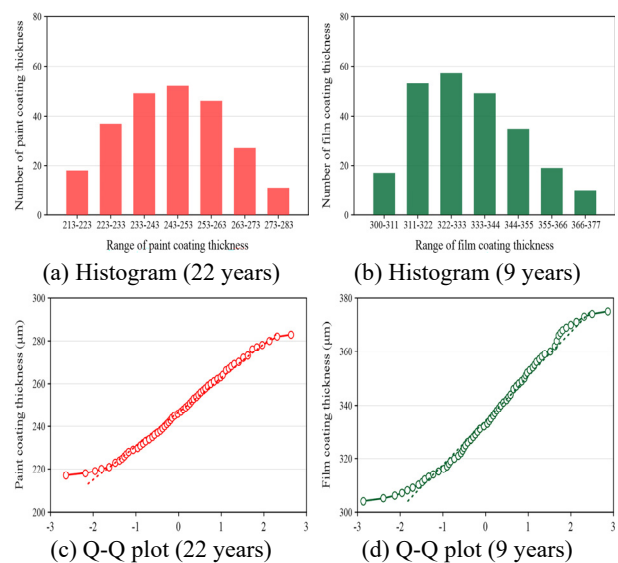


Fig. 6. Normal test of paint coating thickness before removing chalking

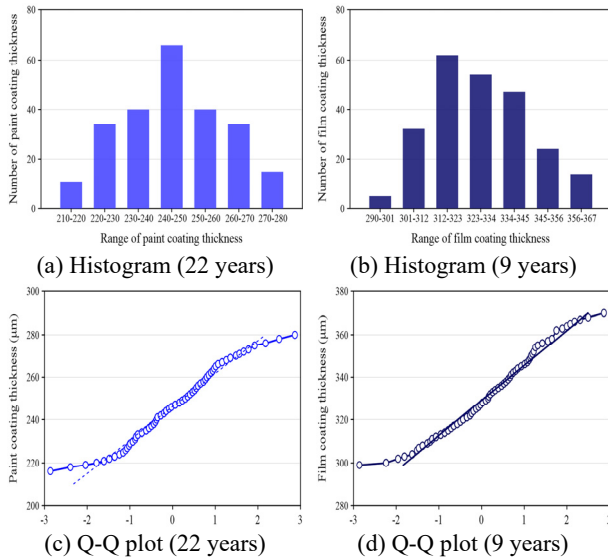


Fig. 7. Normal test of paint coating thickness after removal chalking

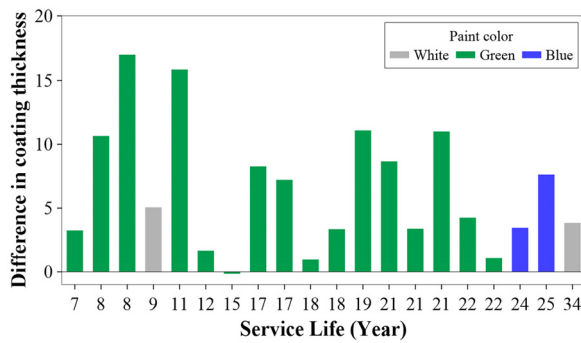


Fig. 8. Difference in paint coating thickness

편차가 클 수 있으며, 도장두께 측정 위치에 따라 측정 값이 상대적일 수 있으므로, 도장두께의 차이가 (+)로 나타난 교량이 나타났다. 또한, 도장두께의 차이가 (+)로 나타난 교량은 백아화 발생량이 상대적으로 적어 도장두께 감소변화가 도막두께 측정 대상 단면내의 도막두께 표준편차 이내로 판단된다.

도장두께가 감소한 교량의 경우, 백아화가 발생함에 따라 최대 약 17.0 μm 수준으로 도장두께가 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 공용연수가 7~34년 수준인 교량을 대상으로 백아화 등급과 도장두께 감소량을 측정하였으나, 최대 도장두께 감소가 발생한 교량의 공용연수는 19년이었으며, 공용연수가 34년으로 최대인 교량은 도장두께가 약 3.99 μm 감소하였다. 이러한 도장두께의 차이는 강교량의 공용연수와 거더의 위치에 따라 도막의 열화 수준이 다르므로 동일한 기준으

로 도막의 열화 상태를 평가 할 수 없음으로 나타난 것으로 판단된다. 도막두께 변화 결과와 같이 백아화가 발생하지 않은 부재에서는 도장두께가 거의 감소하지 않았으나, 백아화가 발생한 부재의 경우 상대적인 도막두께의 변화가 나타날 수 있으며, 그 변화량이 상대적으로 적으므로 이를 합리적으로 고려할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 도막두께는 변화는 도장의 종류에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 도장의 종류와 강교량 방향 등을 고려하여 변색 및 백아화를 도장두께 변화와 연계할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있을 것이다.

3.4 백아화 등급에 따른 색차 및 도장두께 분석 결과

본 연구에서 측정된 20개 교량의 색차, 도장두께, 백아화 평가 결과를 정리하여 Table 3에 나타내었다. 교량별 색차와 백아화 등급을 비교하는 경우, 백아화 제거 전후의 색차가 커지더라도 백아화 등급의 저하와는 상대적으로 상관성이 부족한 것을 알 수 있다. 백아화는 도막표면이 하얗게 변색되는 열화현상이므로, 색차에 의한 영향이 있을 수 있으나, 흰색도장계의 경우 상대적으로 백아화에 의한 도장 색상이 변화가 적을 수 있으며, 흰색도장계 이외의 경우 교량의 공용연수가 증가함에 따라 백아화에 의한 변색 뿐만 아니라 도장색상에 따라 연계할 수 있을 것으로 판단되므로, 색차와 백아화 등급의 연관성이 적게 평가된 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 계측된 교량들의 초기 도장색상에 대한 색정보가 상대적으로 부족하여 내측 거더의 색차를 측정하였으나, 초기 도장의 색상 정보를 명확히 파악하게 되면 색차변화에 따른 백아화 등급의 비교도 가능할 것으로 판단된다.

테이프법을 활용하여 백아화 등급을 평가한 결과, 백아가 테이프의 대부분 면적에 접촉되는 경우 백아화 등급을 D로 평가할 수 있었다. 하지만, 백아화 등급이 B나 C로 평가되는 경우 테이프에 접촉된 백아화 분말을 표준사진과 비교하여 주관적으로 하나의 등급으로 평가하기엔 어려움이 있었다. 따라서, 백아화 등급이 B와 C등급으로 평가되는 경우는 교량 점검자의 주관적인 판단으로 백아화 내구성능 등급이 변화할 수 있으므로, 정량적으로 B와 C등급을 평가할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다.

도장두께와 백아화 등급을 비교하는 경우 교량에 따라 상대적인 차이는 있으나, 도막의 백아화가 진행됨에 따라 도막이 소모되어 미소하지만 두께의 변화가 나타나고 있음을 알 수 있다. 1개 교량의 경우 백아화 제거 전후의 도장두께가 미소하게 증가하였지만, 대상 교량의 백아화 등급은 B등급으로 평가되었으며, 상대적으로 백아화 가 진행되지 않아 도장두께의 변화가 나타나지 않은 것을 알 수 있으며, 도장 시공의 특성을 고려할 때 모든 강부재 표면에 동일한 두께로 도막이 형성될 수 없으므로 대상 교량들의 도장두께의 표준편차가 Table 3과 같이 9.0~31.5까지 나타나는 것을 알 수 있으며, 이로 인하여 두께가 증가하는 경우는 상대적으로

두께의 변화가 도막측정 단면의 도막두께 편차보다 적은 것으로 판단된다.

3.5 머신러닝을 이용한 백아화 등급 평가 결과 및 검증

머신러닝을 이용한 백아화 등급 평가 모델을 검증하기 위하여 Test set을 학습된 모델에 적용하여 예측된 결과로 오차행렬과 정확도를 계산하였다. 본 연구에서 분석된 CNN 모델의 오차행렬 결과는 Table 4와 같이 도출되었다. 또한, 정확도(Accuracy)와 정밀도(Precision), 재현율(Recall)을 식 (2)~(4)을 활용하여 계산한 결과, Table 5와 같이 정확도는 80.00%, 정밀도는 83.68%, 재현율은 80.00%로 나타났다. Table 4와 같이 CNN을 활용한 백아화 등급 평가 과정에서 A등급과 C등급은 95%, D등급은 80%의 정확도로 등급을 분류하였지만, B등급은 50%의 정확도가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 3.4절에서 분석된 내용과 유사하게 백아화가 B등급 수준으로 발생하는 경우 정확한 평가가 어려울 수 있음을 의미할 수 있다. 백아화 B등급 평가에 대한 정확도를 확보하기 위하여 충분한 학습자료를 획득하여 지속적으로 모델을 개선한다면 백아화를 A~D등급까지 명확하게 평가할 수 있을 것이다.

본 연구에서 분석된 CNN 모델은 현재 테이프법과 표준사진을 활용하여 육안으로 평가하던 방법을 간소화하여 사진촬영 자료만으로 등급을 평가할 방안이 될 수 있을 것이다. 또한, 기존 평가 방법을 활용하여 백아

Table 3. Evaluation results of paint chalking

Evaluation results						
Service life	Color	ΔE	Coating thickness difference (μm)	Standard Deviation		Chalking
				Before	After	
7	Green	13.5	3.28	13.0	12.9	D
8	Green	18.3	10.65	26.6	27.3	D
8	Green	4.9	17.00	14.2	13.8	D
9	White	4.0	5.06	17.9	22.4	D
11	Green	32.1	15.85	10.4	10.0	D
12	Green	4.5	1.71	10.2	11.2	D
15	Green	5.1	-0.15	9.1	9.7	B~C
17	Green	19.5	8.30	31.2	30.1	D
17	Green	18.9	7.18	14.7	16.5	B~C
18	Green	20.8	0.96	10.8	11.2	B
18	Green	21.7	3.38	17.4	17.6	D
19	Green	17.7	11.08	13.0	13.0	D
21	Green	20.7	11.00	11.7	13.2	B~C
21	Green	23.9	8.68	12.6	11.4	C~D
21	Green	17.2	3.40	10.4	9.0	D
22	Green	28.0	4.26	11.1	10.0	B~C
22	Green	19.3	1.07	15.9	15.6	D
24	Blue	33.3	3.48	16.8	13.8	B
25	Blue	14.3	7.59	31.5	29.6	D
34	White	4.4	3.86	17.6	14.2	C~D

Table 4. Confusion matrix for VGGNet16 model

Ground truth						
Prediction		A	B	C	D	Total
	A	19	0	1	0	20
	B	1	10	8	1	20
	C	0	1	19	0	20
	D	2	0	2	16	20
Total		22	11	30	17	64

Table 5. Accuracy, precision and recall of each model

VGGNet16 Model	
Accuracy	80.00%
Precision	83.68%
Recall	80.00%

화 등급을 측정한다면 점검자의 판단에 의해 좌우될 수 있는 등급이 등급별 정의에 맞게 정량적으로 측정될 수 있을 것이다. 또한, 백아화 등급에 따른 백아화에 따른 색차 변화의 연관성이 상대적으로 적으므로, 백아화 등급을 사람이 판단하기에 어려움이 있는 경우 머신러닝 기법을 이용하여 도막의 백아화 상태를 평가할 수 있을 것으로 판단되며, 무인 계측장비 등을 이용할 경우 효과적인 도막상태 평가법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\text{정확도 (Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (2)$$

$$\text{정밀도 (Precision)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{재현율 (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

4. 결 론

본 연구에서는 도장열화 지표 중 백아화의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 분석하기 위하여 백아화가 발생한 강교량 20개소를 대상으로 강거더 내측과 외측에 대한 색차, 백아화 수준, 도장두께를 평가하였으며, 사진만으로 백아화 등급을 평가할 수 있는 머신러닝 이용한 상태 등급 평가법의 적용성에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 색차를 측정한 결과, 도장계의 색상에 따라 색차 수준이 상대적으로 나타났으며, 흰색 도장계가 적용된 교량의 경우 백아화가 발생하더라도 상대적으로 색차 변화가 적은 것으로 나타났다. 또한, 테이프법을 활용한 백아화 평가 결과, 거더 내측의 경우, 교량의 공용연수가 증가하더라도 색차가 나타나지 않고 백아화가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 거더 외측의 경우, 햇빛과 외부 대기환경으로부터 지속적인 영향을 받아 백아화 등급이 D등급까지 나타나는 것을 확인하였다.
- 2) 백아화 제거 전후의 도장두께 감소량을 평가한 결과, 백아화가 발생한 부재의 도장두께는 백아화 발생 수준에 따라 감소하고 있음을 확인하였다.

또한, 도장두께의 상대적인 편차에 따라 도장두께 변화량은 색차가 크거나 백아화 등급이 낮을수록 크게 나타나는 것이 아니라 교량의 상대적 위치와 조건에 따라 상대적으로 나타날 수 있음을 알 수 있다.

- 3) 머신러닝 기법을 이용하여 백아화 사진만을 이용하여 백아화 등급을 평가 방법의 적용성 분석 결과, 본 연구에서 분석된 CNN 모델의 정확도는 80%, 정밀도는 83%, 재현율은 80% 수준으로 나타나는 것을 확인하였으며, 백아화 등급에 대한 다양한 사진 정보가 개선된다면 점검자에 의하여 나타날 수 있는 백아화 상태 등급의 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 검토된 강교량의 백아화 상태평가 결과를 이용하여 기존 강교량 도막 내구성능 평가 과정에서 점검자의 육안이나 표준사진에 의존하여 평가되었던 백아화 등급을 정량적으로 평가하거나 상태를 확인하고 이에 따른 도막의 상태를 확인 할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

참고문헌(References)

- [1] Martínez, N., Rico, A., Múñez, C.J., Prieto, C., and Poza, P. (2020) Improving Durability of Silicone-Based Paint Coatings Used in Solar Power Plants by Controlling Consolidation Procedures, *Solar Energy*, Elsevier, Vol.119, pp.585-595.
- [2] Gergely, A., Pászti, Z., Hakkell, O., Drotár, E., Mihály, J., and Kálmán, E. (2012) Corrosion Protection of Cold-Rolled Steel with Alkyd Paint Coatings Compositized with Submicron-Structure Types Polypyrrole-Modified Nano-Size Alumina and Carbon Nanotubes, *Materials Science and Engineering: B*, Elsevier, Vol.117, No.18, pp.1571-1582.
- [3] Deshmukh, K., Parsai, R., Anshul, A., Singh, A., Bharadwaj, P., Gupta, R., Mishra, D., and Amritphale, S.S. (2017) Studies on Fly Ash Based Geopolymeric

- Material for Coating on Mild Steel by Paint Brush Technique, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Elsevier, Vol.75, pp.139-144.
- [4] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016) *Paint Coating*, KCS 14 31 40 : 2016, MOLIT, Korea (in Korean).
- [5] Kim, G.-H., Jeong, Y.-S., Ahn, J.-H., and Kim, I.-T. (2021) Evaluation of Deterioration Propagation Life of Steel Bridge Paints According to Surface Treatment Methods and Heavy-Duty Painting Types, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.25, No.1, pp.75-84 (in Korean).
- [6] Hu, J., He, S., Wang, Z., Zhu, J., Wei, L., and Chen, Z. (2019) Stearic Acid-Coated Superhydrophobic Fe₂O₃/Fe₃O₄ Composite Film on N80 Steel for Corrosion Protection, *Surface & Coatings Technology*, Elsevier, Vol.359, pp.47-54.
- [7] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), and KALIS (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety) (2021) *Detailed Guidelines for safety and Maintenance of Facility (Performance Evaluation)*, KALIS, Korea (in Korean).
- [8] KSA (Korean Standards Association) (2022) *Paints and Varnishes - Evaluation of Degradation of Coatings - Designation of Quantity and Size of Defects, and of Intensity of Uniform Changes in Appearance - Part 6: Assessment of Degree of Chalking by Tape Method*, KS M ISO 4628-6, KSA, Korea (in Korean).
- [9] Cho, G.-H., Lim, M.-H., and Park, D.-C. (2015) Effect of Coating Materials for Steel on the Threshold of Corrosive Amount of Airborne Chlorides and the Evaluation of Their Corrosion Speeds, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, KIC, Vol.15, No.2, pp.143-151 (in Korean).
- [10] Lee, C.Y., and Chang, T. (2016) Service Life Prediction for Steel Bridge Coatings with Type of Coating Systems, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.5, pp.325-335 (in Korean).
- [11] Weng, W.C., Song, S.Y., Park, K.M., Cha, K.H., and Kim, I.T. (2022) An Approach for Estimating Heated Temperature in Steel Bridge Based on Surface Condition Change of Heavy-Duty Painting Systems, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.2, pp.89-100 (in Korean).
- [12] Cha, K.H., Park, J.H., Yun, S.Y., Kim, G.H., and Kim, I.T. (2020) Experimental Study on Estimation of Fire Temperature Based on Change in Surface Condition of Steel Bridge Paints, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.139-148 (in Korean).
- [13] Park, J., and Kang, D. (2021) A Study on the Influence Factors of Coating Thickness of Thermal Insulation Paints to Prevent Buckling of CWR in Summer Season, *Journal of Korean Society for Urban Railway*, KOSUR, Vol.9, No.4, pp.1091-1099 (in Korean).
- [14] Cao, Q., Oluwoye, I., Pojtanabuntoeng, T., Farhat, H., and Iannuzzi, M. (2023) Evaluation of Epoxy-Based Coating Degradation under Thermal Insulation at Elevated Temperatures on Different Steel Substrates, *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, Vol.180, 107544.
- [15] Otsuka, M., and Kusuhara, S. (2016) Development of Deterioration Prediction Method for Heavy-Duty Coating, *Journal of Society of Civil Engineers*, JSCE, Vol.62A, pp.492-502 (in Japanese).
- [16] AQSIQ (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine) (2008) *Paints and Varnishes - Rating Schemes of Degradation of Coats*, GB/T 1766-2008, AQSIQ, China (in Chinese).
- [17] SSPC (The Society for Protective Coatings) (2018) *Hand Tool Cleaning*, SSPC-SP 2, SSPC, US.
- [18] Cho, M., Lee, J.H., Ryu, Y.-M., Park, J., and Yoon, H. (2021) Image-Based Automatic Bridge Component Classification Using Deep Learning, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol.41, No.6, pp.751-760 (in Korean).
- [19] Choi, Y.-S., Kim, J.-H., Cho, H.-C., and Lee, C.-J. (2019) Asphalt Concrete Pavement Surface Crack Detection Using Convolutional Neural Network, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.23, No.6, pp.38-44 (in Korean).
- [20] Jung, S.-Y., Lee, S.-K., Park, C.-I., Cho, S.-Y., and Yu, J.-H. (2019) A Method for Detecting Concrete Cracks Using Deep-Learning and Image Processing, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.35, No.11, pp.163-170 (in Korean).
- [21] Simonyan, K., and Zisserman, A. (2015) Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations*, ICLR, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>.

[22] Ang, A.H.-S., and Tang, W.H. (2007) *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to*

Civil and Environmental Engineering (2nd Ed.), Wiley, US.

요약: 본 연구에서는 강교량 도장의 백아화와 상태평가 방법을 분석하기 위하여 공용 중 강교량 20개를 선정하여 색차, 백아화, 도장두께를 측정하였다. 색차계를 활용하여 색차를 측정하고, 테이프법과 표준사진을 활용하여 백아화 등급을 평가하였으며, 백아화 제거 전후의 도장두께를 측정하여 백아화 발생 수준에 따른 도장두께 감소량을 평가하였다. 색차 분석 결과, 도장계의 색상에 따라 상대적으로 색차가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 흰색 도장계는 백아화가 발생하더라도 색차가 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 백아화 등급과 도장두께 평가 결과, 백아화는 외측에 위치한 강부재에 발생하였으며, 백아화가 발생함에 따라 도장두께가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 도장두께는 백아화 수준이나 상대적인 편차에 따라 감소량이 상대적일 수 있음을 확인하였다. 추가적으로, 백아화 등급 평가 방법을 간소화하기 위한 방법으로 사진촬영 이미지만으로 백아화를 평가할 수 있는 Convolutional Neural Network (CNN)을 머신러닝 기법으로 적용하여 분석하였다.

핵심용어: 강교량, 백아화, 색차, 도막두께, 머신러닝
