

# 일반중방식 도장계의 표면상태 변화를 이용한 강교의 수열온도 추정법

옹왕치<sup>1</sup> · 송시윤<sup>1</sup> · 박광명<sup>1</sup> · 차기혁<sup>2</sup> · 김인태<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, <sup>2</sup>차장, 부산시설공단, 기술혁신팀, <sup>3</sup>교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과

## An Approach for Estimating Heated Temperature in Steel Bridge Based on Surface Condition Change of Heavy-Duty Painting Systems

Weng, Wang Chi<sup>1</sup>, Song, Si Yun<sup>1</sup>, Park, Kwang Myeong<sup>1</sup>, Cha, Ki Hyuk<sup>2</sup>, Kim, In Tae<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Master's Course), Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>2</sup>Team Manager, Busan Infrastructure Corporation, Busan, 47132, Korea

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

**Abstract** - In this study, an approach for quickly estimating the heated temperature of a fire damaged steel bridge by visual inspection was experimentally studied. In the test, 4 types of general heavy-duty painting systems of urethane, polysiloxane, ceramic, and fluorocarbon according to the Korean Construction Specifications (KCS 14 31 40) were heated by electric and gas furnace equipments. The heating temperatures are 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C and heating duration time is fixed at 30 minutes. From the test results, the difference of paint surface change according to the types of painting systems and heating methods was not significant and the heated temperature could be estimated from the change in paint surface change. Visual inspection procedure for judging traffic restriction or resumption was proposed.

**Keywords** - Steel bridge, Fire, Heavy-duty painting system, Paint surface, Visual inspection, Heating test

### 1. 서론

최근 화재에 의한 도로교의 피해 사례가 보고되고 있으며 피해 규모도 증가하고 있다<sup>[1]-[5]</sup>. 교량이 화재에 의해 열 영향을 받으면 수열정도에 따라 콘크리트와 강재의 역학적 특성에 미치는 영향이 다르므로<sup>[6]-[10]</sup>, 차량통행 제한 및 재개의 판단, 벤트 설치 등의 긴급조치 실시 여부와 보수보강 대책수립에는 수열온도를 신속하고 정확하게 추정하는 것이 요구된다. 콘크리트는 그을음 부착(300 °C 이하), 핑크색 또는 적색(300 °C - 600 °C), 회백색(600 °C - 900 °C), 담황색(900 °C - 1,000 °C)과 같이 육안조사에 의한 표면 상태평가로부터 수열온도 범위를 개략적으로 추정할 수 있다<sup>[11],[12]</sup>.

한편 강재의 경우에는 변형이 발생하였으면 내하력에 영향을 미치고 있는 것은 명확하지만, 변형이 발생하지 않았으면 현장 육안조사로 강재의 수열온도를 개략적으로 추정하는 것이 곤란하다. 이에 대부분의 강구조물은 도장에 의해 피복방식 처리되어 있어, 화재에 의한 도장의 표면상태 변화로부터 강재의 수열온도를 추정하는 방법에 관한 연구가 진행되어 왔다.

국외의 경우, 일본토목연구소<sup>[13]</sup>는 일본 강교량에 적용되고 있는 도장계를 대상으로 전기로 및 가스로 가열실험을 실시하여 화재에 의한 수열온도 추정을 위한 도막손상 견본사진집을 발간하였으며, 도장계의 종류 및 가열방법에 따라 수열온도에 대한 도막의 표면상태에 차이가 있음을 확인하였다. 국내의 경우, Cha *et al.*<sup>[14],[15]</sup>은 국내 일반중방식 도장계(KCS 14 31 40의 4종류)를 대상으로 전기로 가열실험을 실시하여 육안조사에 의한 도장의 표면 상태변화로부터 화재에 의한 강부재의 수열온도 범위를 개략적으로 추정하였다. 그리고 화재발생시의 가연물, 공기의 공급 상태를 고려하여 전기로 가열실험뿐만 아니라, 가스로 가열실험에 의한 도장 표면상태 변화에 대한 검토 및 도료 제작사가

Note.-Discussion open until October 31, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 11, 2022; revised on March 08, 2022; approved on March 08, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. [itkim@pusan.ac.kr](mailto:itkim@pusan.ac.kr)

다른 도장계에 대한 추가 실험적 검토가 필요함을 확인하였다. 또한 가열방법 및 도장계를 고려한 도장 표면상태 변화에 따른 수열온도 추정에 있어, 화재원인이 다르고 적용 도장계가 다양한 실제 현장 적용을 위해서는 가열방법, 도장계의 종류, 도막손상 사진 등 실험데이터의 축적이 필요함을 확인하였다.

우리나라 강교량 도장은 1970년대 조합페인트, 1980년대 염화고무계, 2000년대부터는 내후성중방식도장계(우레탄계, 불소수지계)가 널리 적용되고 있으며, 2016년 표준시방서(KCS 14 31 40 도장)에는 일반중방식도장계(우레탄계, 불소수지계, 세라믹계, 실록산계)를 적용하도록 하고 있다.

본 연구에서는 전기로와 가스로의 가열방법에 따른 도장계별의 표면상태 변화를 실험적으로 검토하여 육안조사에 의한 수열온도 추정법 및 화재 후 초동 대처방안을 제시하기 위해 도장 강재시편의 가열실험을 실시하였다. 본 실험에서는 국토교통부 표준시방서(KCS 14 31 40)<sup>[16]</sup>의 강교량 일반 중방식계열인 우레탄계마감, 실록산계마감, 세라믹계마감 및 불소수지계 마감 총 4종류의 도장시편을 제작하여, 전기로와 가스로 가열실험(가열온도 200℃, 300℃, 400℃, 500℃, 600℃와 가열 지속시간 30분)을 실시하였다.

## 2. 실험절차

### 2.1 도장시편 제작

본 실험에서는 두께 10 mm의 SS275 강판에서 140 mm × 150 mm로 절단한 강재시편을 블라스트 표면처리(SSPC SP-10)<sup>[17]</sup>한 후 표준시방서(KCS 14 31 40: 2019 도장)에 근거하여 강교량 일반중방식계열인 불소수지계마감(F), 실록

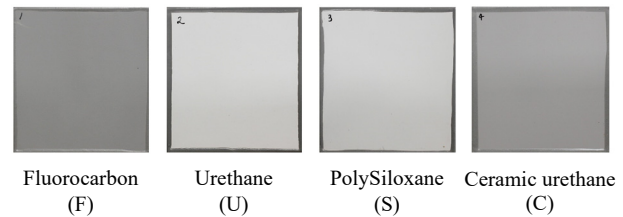
산계마감(S), 우레탄계마감(U), 세라믹계마감(C)의 4종류 도장을 실시하였다. SS275 강재의 재료특성 및 화학성분을 각각 Tables 1-2에, 도장 사양은 Table 3에 나타냈으며, 제작 완료된 도장 강재시편의 외관상태는 Fig. 1에 나타내었다.

**Table 1.** Material properties

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at failure (%)
SS275	342	416	40

**Table 2.** Chemical compositions (Unit: wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS275	0.150	0.100	0.390	0.014	0.007



**Fig. 1.** Painted test specimens

### 2.2 전기로와 가스로 가열실험 조건

본 연구에서는 화재 발생시의 화재 온도와 지속시간을 모사하기 위하여 전기로와 가스로를 이용하여 가열실험을 실시하였다.

강교량 일반 중방식도장계 4종류 시편을 대상으로 하였으며, 전기로와 가스조에 의한 가열온도 및 지속시간의 범위는 Table 4에 나타낸 것과 같다. 가열온도는 200℃에서 600℃까지 100℃ 간격으로 하였으며, 가열온도의 지속시

**Table 3.** Painting system of specimens

Symbol	Painting type	Paint colors	Painting layer			Paint film thickness (μm)
			1st	2nd	3rd	
F	Fluorocarbon	Gray	Inorganic Zinc (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Fluorocarbon (50 μm)	225
U	Urethane	White	Inorganic Zinc (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Urethane (80 μm)	255
S	Siloxane	White	Inorganic Zinc (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Polysiloxane (60 μm)	235
C	Ceramic	Gray	Inorganic Zinc (75 μm)	Ceramic protective paint (100 μm)	Ceramic urethane (75 μm)	250

간은 30분으로 하였다. 가열온도는 강교량의 주부재에 큰 변형이나 좌굴이 발생하지 않는 수열온도 범위 내<sup>[18],[19]</sup>로 최고온도를 600°C로 설정하였으며, 소방방재청의 ‘화재성장곡선에 따른 대응시간 이론 및 시간대별 생존률’<sup>[19],[20]</sup>에 근거하여 지속시간은 30분으로 설정하였다.

**Table 4.** Total number of test specimens

Temperature (°C)	Electric furnace				Gas furnace			
	F	U	S	C	F	U	S	C
200	1	1	1	1	1	1	1	1
300	1	1	1	1	1	1	1	1
400	1	1	1	1	1	1	1	1
500	1	1	1	1	1	1	1	1
600	1	1	1	1	1	1	1	1

### 2.3 전기로와 가스로 가열실험 방법

화재 발생시의 가연물, 공기의 공급 상태를 고려하여 전기로와 가스로 가열실험을 실시하였다.

전기로 가열실험은 가열온도 관리가 용이하며 밀폐되어 있어 불완전연소가 발생하는 좁은 공간 및 화염에 직접 접촉하지 않는 경우를 모사할 수 있다. 한편 가스로 가열실험은 가열온도 관리가 곤란하지만, 산소의 상시 공급으로 완전연소에 가까워 형하공간이 넓은 교량에 대응되며 화염에 직, 간접 접촉을 모사할 수 있다.

본 실험의 전기로 가열실험에는 디지털 전기로(1,200°C)를 사용하였으며(Fig. 2 참조), 가스로 가열실험에는 적합한 기성제품이 없어 자체 제작하였다.

#### 2.3.1 전기로 가열실험

- ① 실험 전 시편의 외관 사진 촬영, 광택도·색차·도막두



**Fig. 2.** Electric furnace test setup

#### ② 측정

- ② 목표 온도까지 전기로 체임버 내의 온도를 상승시킴
- ③ 목표 온도에 도달하면, 체임버 도어를 개폐하여 시편을 투입하고 30분간 가열시킴
- ④ 체임버 도어를 열어 냉각 후 시편의 외관 사진 촬영, 광택도·색차·도막두 측정

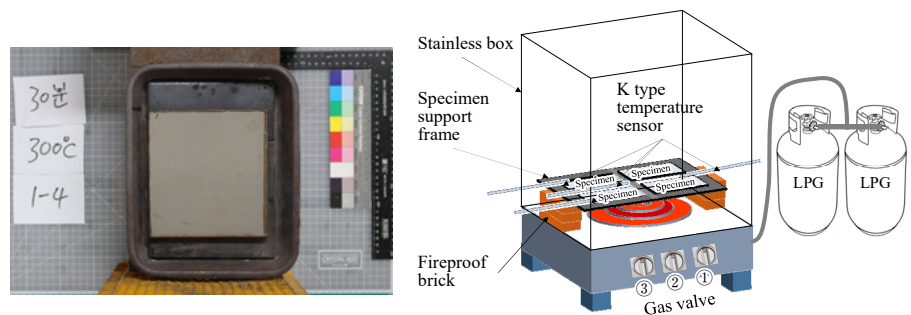
### 2.3.2 가스로 가열실험

#### (1) 가스로 가열장치 제작

가스로 가열실험은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 업소용 3구 가스버너를 이용하여 도장시편의 한쪽 면을 가열하였다. 열원이 되는 가스버너는 열량 21,000 kcal/hr이고 가스소비량이 20.5 kW인 원형버너(직경 345 mm)를 사용하였으며, 사용한 가스는 LPG가스로 압력조절기를 통해 버너에 연결하였다. 그리고 가스버너로부터의 열이 효율적으로 도장시편 표면에 전달되고 주변 온도 유지가 용이하게 사각형 튜브형태의 스테인리스 바람막이를 설치하였다.

열원으로부터 도장시편까지의 거리를 조절하기 위하여 시편 거치대를 제작하였으며, 목표온도로 가열할 수 있도록 시편 거치대의 위치를 상하로 이동할 수 있도록 하였다. 시편 거치대의 상하 이동은 이를 받치고 있는 내화벽돌의 층수로 조절하였다. 그리고 가열온도는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 거치대의 중앙부, 오른쪽 단부 2곳, 왼쪽 단부 1곳에 K형 온도센서를 설치하여 5초 간격으로 온도를 측정하였으며 측정결과는 Fig. 4와 같다.

가스로의 가열온도는 3개(①, ②, ③)의 가스 밸브 개폐 정도와 시편 거치대의 상하 위치(버너로부터 이격 거리)로 조절할 수 있다. 이에 사전실험에서는 일정한 가열온도 확보 및 유지가 가능한 시편 설치 영역을 확인하였으며, 목표 가열온도를 구현할 수 있는 3개 가스 밸브의 개폐 정도와 시편 거치대의 상하 위치를 도출하였다(Table 5 참조).



**Fig. 3.** Gas furnace

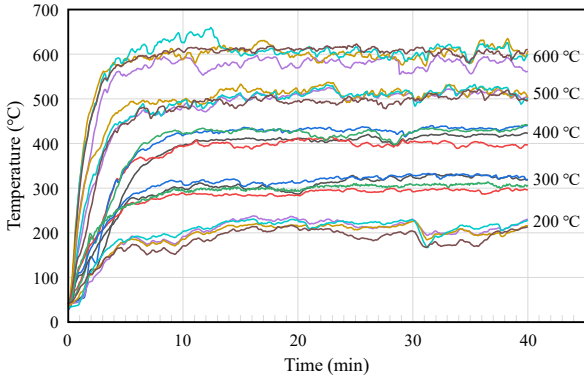


Fig. 4. Temperature changes according to heating time

Table 5. Temperature range and determination of temperature conditions during actual experiments

Designed temperature (°C)	Measured temperature (°C)	Brick layer	Gas valve
200	200 ± 30	7	Half open of 2nd valve
300	300 ± 24	4	Full open of 2nd valve
400	400 ± 35	7	Full open of 2nd and 3rd valves
500	500 ± 25	3	Half open of 2nd and 3rd valves
600	600 ± 34	3	Full open of 2nd and 3rd valves

(2) 가스로 가열실험 절차

가스로 가열실험 절차는 아래와 같다.

- ① 실험 전 시편의 외관 사진 촬영, 광택도·색차·도막두께 측정
- ② 강판을 거치대에 놓고 목표 온도 도달 확인
- ③ 강판을 도장시편으로 교체 설치
- ④ 30분 경과 후 소화 및 냉각, 외관사진 촬영, 광택도·색차·도막두께 측정



Fig. 5. Gas furnace test setup

### 3. 도막의 상태평가

#### 3.1 가열온도 및 가열방법에 따른 도막 외관 상태평가

가열온도와 가열방법에 따른 시편의 표면상태 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 전기로의 경우 도장계의 종류에 상관없이 200 °C에서 미미하게 변색되었으며, 300 °C에서 황변(노랗게 변색)이 발생하였다. 400 °C에서 불소수지계(F)는 탄화(검게 변색)와 박리가 발생하였으며, 우레탄계(U)는 탄화와 부풀음, 실록산계(S)는 열은 탄화와 부풀음, 세라믹계(C)는 탄화가 발생하였다. 500 °C와 600 °C에서 불소수지계(F), 우레탄계(U) 및 세라믹계(C)는 백색화와 박리가 발생하였으며, 실록산계(S)는 탄화와 박리가 발생하였다.

다음으로 가스로의 경우에는 전기로와 같이 도장계의 종류에 상관없이 200 °C에서 미미하게 변색되었으며, 300 °C에서 황변(노랗게 변색)이 발생하였다. 400 °C에서 불소수지계(F)는 탄화와 박리가 발생하였으며, 우레탄계(U), 실록산계(S)와 세라믹계(C)는 탄화가 발생하였다. 500 °C에서 불소수지계(F)는 백색화와 박리가 발생하였으며, 우레탄계(U), 실록산계(S)와 세라믹계(C)는 국부적으로 탄화와 박리가 발생하였다. 600 °C에서 불소수지계(F), 우레탄계(U), 실록산계(S) 및 세라믹계(C)의 모든 도장시편에서 백색화와 박리가 발생하였다.

전기로와 가스로의 가열방법에 따른 도장의 표면상태 변화에는 현저한 차이가 없으며, 일부 가열온도에 의해 차이가 발생하는 것은 가스로 가열의 경우 일정 가열온도 유지가 곤란하여 가열온도 변동에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 일반증방식 도장계는 200 °C까지는 현저한 변화가 없으며, 300 °C에서 황변, 400 °C에서 탄화, 부풀음 및 박리, 500 °C와 600 °C에서 백색화가 발생함을 알 수 있다.

#### 3.2 가열온도 및 가열방법에 따른 도막 외관 상태평가

##### 3.2.1 도막의 광택보유율

광택은 거울과 같이 빛을 반사하는 능력으로 특정지어지는 표면의 광학적 성질로 도장의 열화정도를 평가하는 항목 중의 하나이다<sup>[21]</sup>. 도막의 부풀음, 박리 또는 균열이 발생하지 않은 경우에 적용할 수 있어, 본 실험에서는 60° 광택계를 이용하여 부풀음이나 박리가 발생하지 않은 가열온도 200 °C, 300 °C의 도장시편에 대해서 측정하였다. 열영향을 받은 도장의 광택 변화를 평가하기 위하여 가열 전·후 도

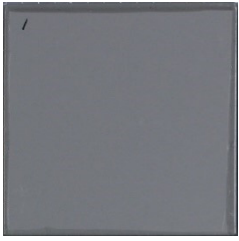
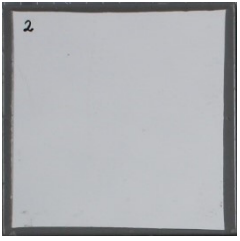
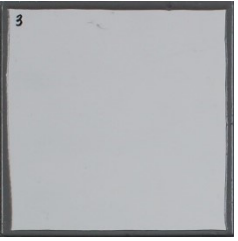
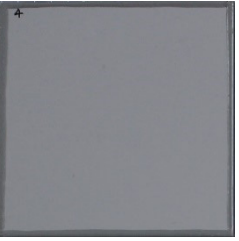





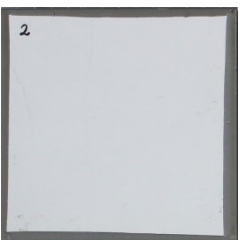
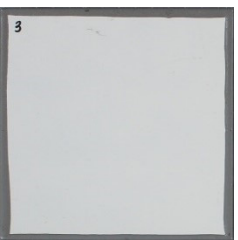
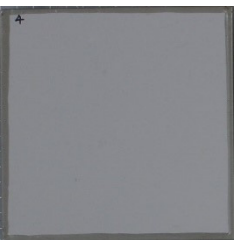







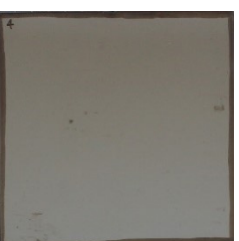




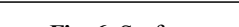
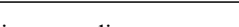
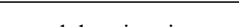

Temperature (°C)	Furnace	Fluorocarbon	Urethane	Siloxane	Ceramic
		30 min	30 min	30 min	30 min
Initial					
					
200	Electric				
	Gas				
300	Electric				
	Gas				
400	Electric				

Fig. 6. Surface condition according to temperature and duration time

Temperature (°C)	Furnace	Fluorocarbon	Urethane	Siloxane	Ceramic
		30 min	30 min	30 min	30 min
400	Gas				
	Electric				
500	Gas				
	Electric				
600	Gas				
	Electric				

Fig. 6. (Continued)

장시편 표면을 상부, 중앙부, 하부의 3개 부분으로 구분하고 각각의 광택값을 측정하여 이를 평균하였다. 그리고 광택 변화는 가열 전의 광택값에 대한 가열 후의 광택값 비율인 광택보유율(%)로 평가할 수 있다. 가열온도에 따른 도장계 별 광택보유율을 Fig. 7에 나타내었다.

가열온도에 따른 도장계의 광택보유율을 비교하였을 때, Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 전기로 가열의 경우 200 °C에서 4종류 도장계는 80 % - 83 %의 광택보유율을 나타내었으며, 300 °C로 가열온도가 증가함에 따라 불소수지계와 실록산계는 약 70 % 정도로 감소하고, 세라믹계는 26 %, 우레

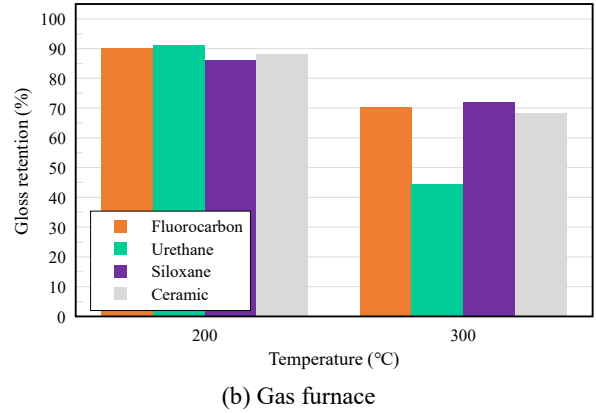
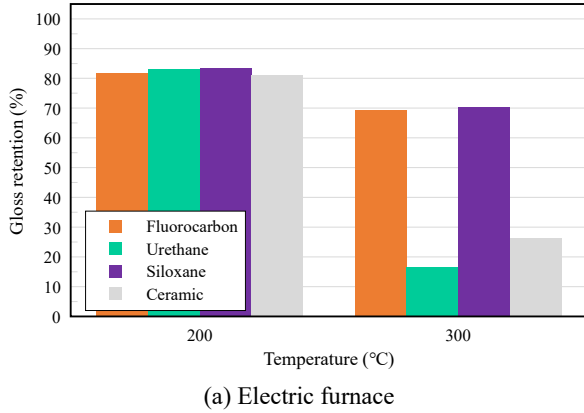


Fig. 7. Gloss retention

탄계는 16%로 감소하였다. 그리고 Fig. 7(b)에 나타난 것과 같이 가스로 가열의 경우 200°C에서 4종류 도장계는 86% - 91%의 광택보유율을 나타내었으며, 300°C로 가열온도가 증가함에 따라 불소수지계, 실록산계는 약 70% 정도로 감소하고 세라믹계는 68%, 우레탄계는 44%로 감소하였다. 따라서 일반중방식 도장계의 광택은 가열온도 200°C에서 도장계에 상관없이 약 80% 이상의 광택보유율을 나타내었으며, 300°C에서는 불소수지계와 실록산계는 약 70% 정도, 세라믹계와 우레탄계는 30%로 감소한 경우도 있다. 그리고 불소수지계와 실록산계는 전기로와 가스로의 가열 방법에 따른 현저한 차이는 발생하지 않으나, 우레탄계와 세라믹계의 경우, 300°C에서 가열방법에 따라 광택보유율의 차이가 크게 나타나며, 전기로 가열에 의해 광택감소가 더 크게 발생하였다.

### 3.2.2 도막의 색차

색차계를 이용하여 박리가 발생하지 않은 200°C, 300°C, 400°C 도장시편 표면을 상부, 중앙부, 하부의 3개 부분으로 구분하여 가열 전·후에 각 동일 지점에서의  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ 을 측정하고 이를 식 (1)에 대입하여 색차( $\Delta E^*$ )를 계산하였다. 그리고 식 (2)를 이용하여 National Bureau of Standards(NBS) units을 계산하였다.

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

여기서  $L^*$ 값은 밝기를 나타내는 것으로 검정( $L^*=0$ )과 흰색( $L^*=100$ )의 관계를 나타내고,  $a^*$  값은 빨강(+)과 초록(-)의 관계,  $b^*$  값은 노랑(+)과 파랑(-)의 관계를 나타낸다(Fig. 8 참조). 그리고  $\Delta$ 는 가열실험 전과 후의 변화량을 나타낸다.

$$\text{NBS units} = \Delta E^* \times 0.92 \quad (2)$$

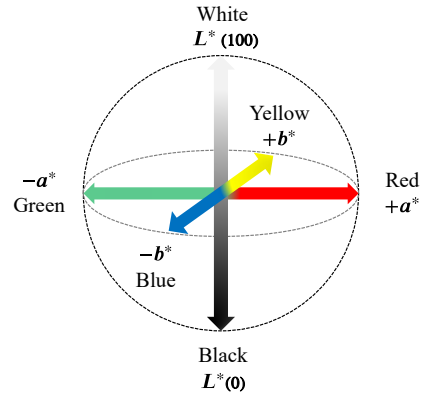


Fig. 8. CIE 1976  $L^*a^*b^*$  color space

가열온도와 도장계에 따른  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ 을 각각 Figs. 9-11에 나타내었다. 단 전기로 400°C 가열의 경우, 도막이 박리되어 색차측정이 불가능하여 제외하였다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이, 가열온도가 200°C, 300°C, 400°C로 증가함에 따라 도막 표면색의 밝기( $L^*$ )는 200°C에는 가열 전과 비교하여 변화가 없으며, 가열온도가 300°C로 증가함에 따라 검정색으로 변해가는 흑색화(탄화)가 현저하게 나타나며, 400°C에도 흑색화는 계속 진행됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이, 가열온도가 200°C, 300°C, 400°C로 증가함에 따라 도막 표면색의 빨강(+)과 초록(-)과의 관계( $a^*$ )는 200°C에는 가열 전과 비교하여 변화가 없으며, 가열온도가 300°C로 증가함에 따라 초기 회색의 불소수지계와 세라믹계는 초록색으로 변화가, 초기 흰색의 우레탄계와 실록산계는 빨강색으로 변화가 확인되었다. Fig. 11

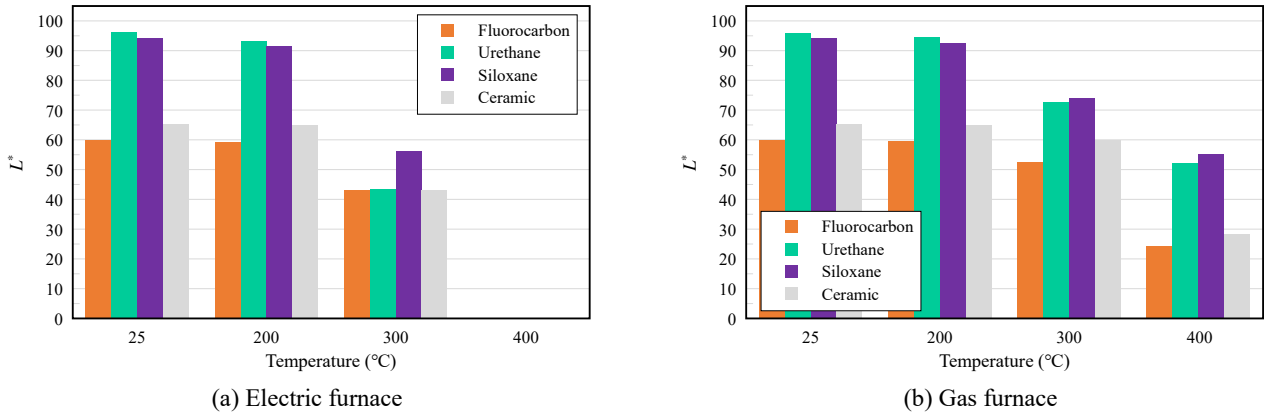


Fig. 9. Change between black and white with temperature

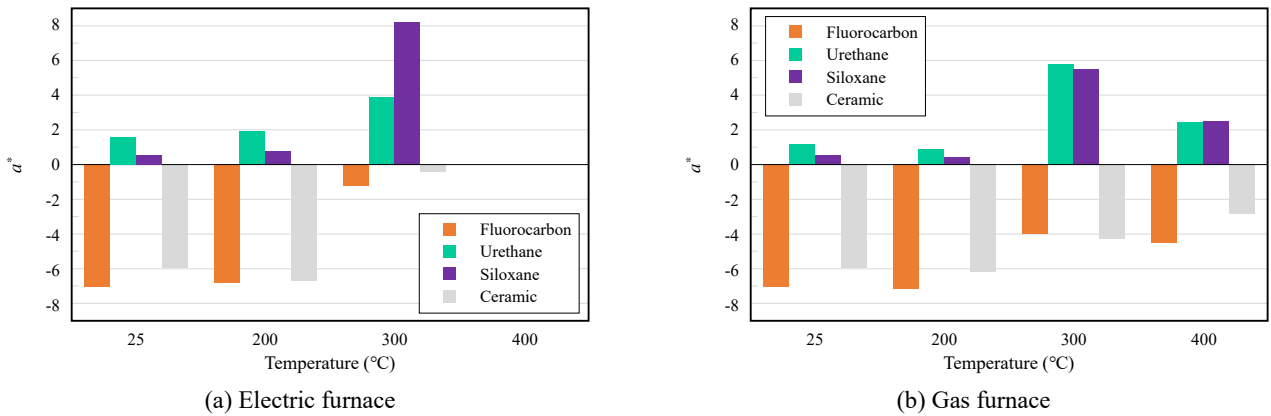


Fig. 10. Change between red and green with temperature

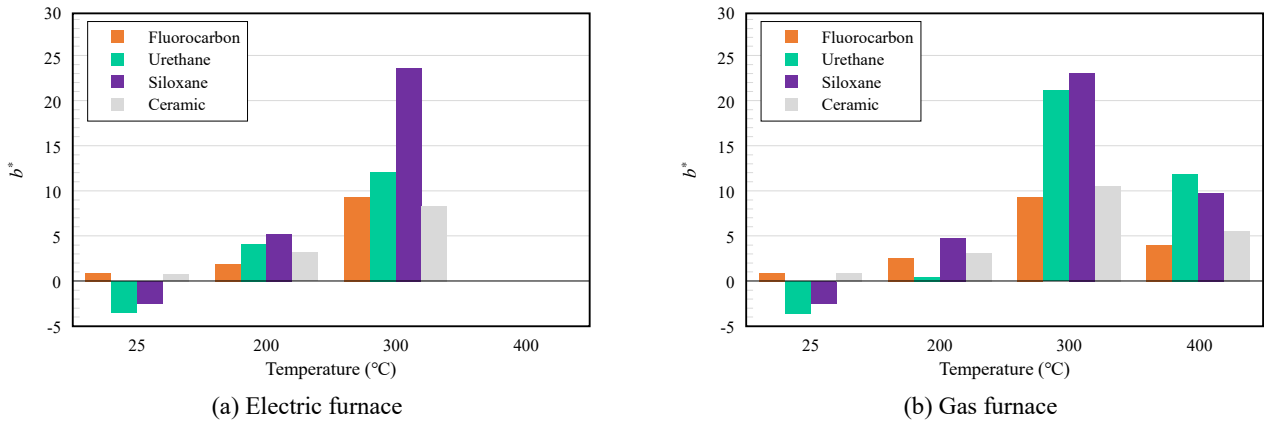


Fig. 11. Change between yellow and blue with temperature

에 나타난 것과 같이, 가열온도가 증가함에 따라 도막 표면 색의 노랑(+)과 파랑(-)과의 관계( $b^*$ )는 200 °C에서 노랑색으로 변화하며, 가열온도가 300 °C로 증가함에 따라 노랑색으로 변화(황변화)가 현저히 나타났다. 그리고 가열온도에 따른 도장계별  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ 의 변화에 차이는 있으나, 가열방법에 따른 현저한 차이는 나타나지 않았다.

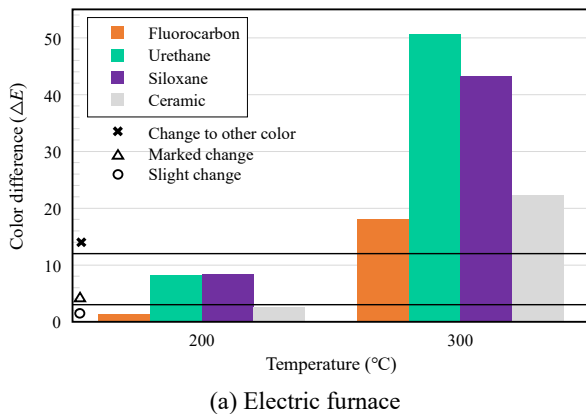
가열온도 및 도장계에 따른 색차를 NBS 등급으로 분류하여 Fig. 12 및 Table 6에 나타내었다. Fig. 12(a)에 나타난 것과 같이 전기로 가열에 의한 색차를 비교하면, 가열온도 200 °C에서 불소수지계(F), 세라믹계(C)는 미미하게 변색되었으며, 실록산계(S), 우레탄계(U)는 현저하게 변색되었다. 그리고 300 °C에서는 4종류 모두 다른 색으로 변색되었



다. Fig. 12(b)에 나타난 것과 같이 가스로 가열에 의한 색차를 비교하면, 가열온도 200 °C에서 불소수지계(F), 세라믹계(C)는 미미하게 변색되었으며, 실록산계(S), 우레탄계(U)는 현저하게 변색되었다. 그리고 300 °C에서 우레탄계와 실록산계는 다른 색으로 변색되었다. 전기로와 가스로의 가열 방법에 따른 색차를 비교하면 전기로가 가스로에 비해 더 현저한 색차를 나타내었다.

**Table 6.** National Bureau of Standards (NBS) ratings

N.B.S unit	Sensitive expression of color difference	Rating
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 -	Very much (change to other color)	×

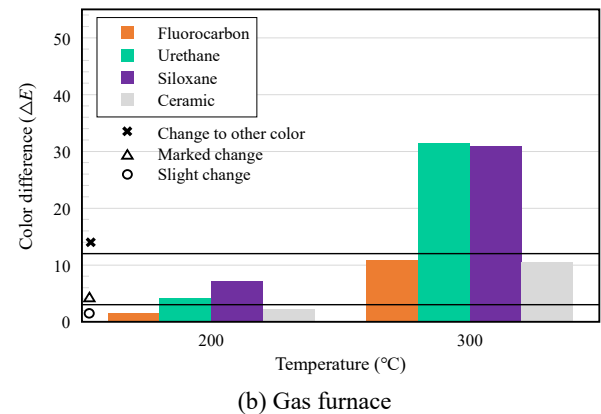


### 3.2.3 도막의 두께

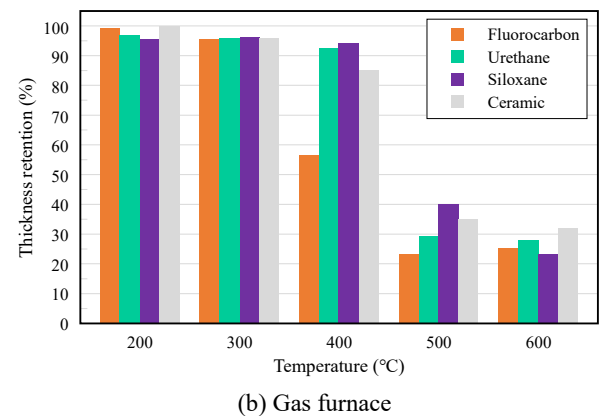
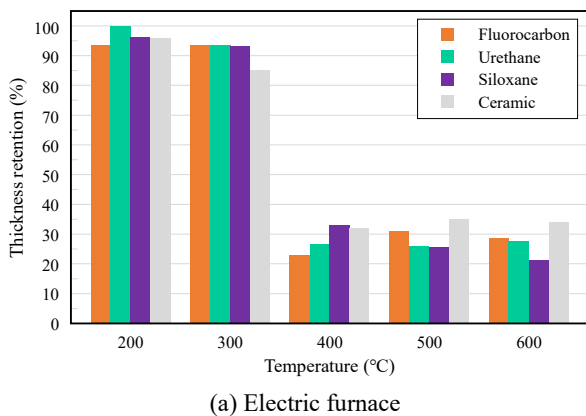
도막두께 측정기를 이용하여 도막박리가 발생하지 않은 200 °C, 300 °C 도장시편 표면을 상부, 중앙부, 하부의 3개 부분으로 구분하여 가열 전·후 각 동일 지점에서 도막두께를 측정하였다. 도막 박리가 발생한 400 °C, 500 °C, 600 °C의 도장시편은 브러시로 박리된 도막을 제거하고 잔존 도막두께를 측정하였다. 그리고 초기 도막두께에 대한 가열 실험 후의 도막두께 비율인 잔존 도막두께율(%)을 계산하여 Fig. 13에 나타내었다. 도막박리가 발생하지 않은 가열온도 200 °C 및 300 °C에서는 가열방법에 따른 도막두께의 현저한 변화는 발생하지 않았다. 그리고 도막박리가 발생한 400 °C 이상에서 잔존 도막두께는 약 70 μm - 100 μm 정도로 중도와 상도 도막이 박리되었음을 확인할 수 있고, 600 °C까지 하도가 남아있음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 도장의 표면상태 변화로부터 화재 온도 추정법

본 실험 결과, 일반중방식 도장계의 표면상태는 가열온



**Fig. 12.** Color difference



**Fig. 13.** Thickness retention

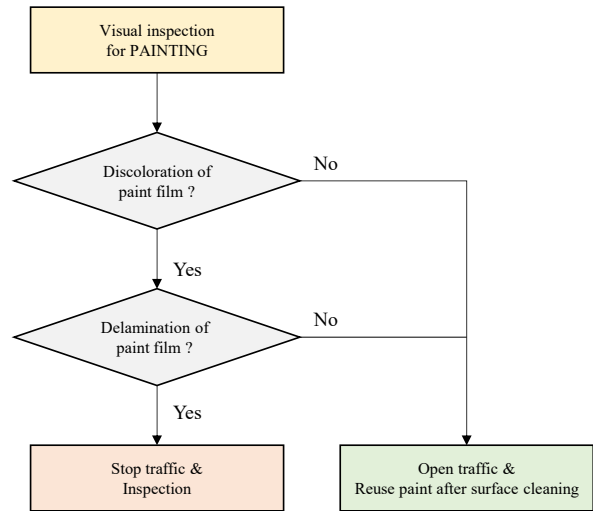
도에 따라 뚜렷하게 변화함을 확인하였다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 강교량 일반중방식 도장계(불소수지계, 우레탄계, 실록산계, 세라믹계)는 200 °C까지는 미미하게 변화하며, 300 °C에서 황변화, 400 °C에서 흑색화(탄화), 부풀음 및 박리, 500 °C에서 백색화가 발생함을 알 수 있다. 기존 Cha *et al.*의 실험 결과<sup>[14],[15]</sup>, 도로 제작사가 다른 일반중방식 도장계 4종류는 200 °C - 300 °C에서 변색이 발생하고 300 °C - 400 °C에서 흑색화 및 상도 박리가 발생하였다. 따라서 이들 결과를 종합적으로 고려하면, 가열온도에 따른 도막 표면상태는 Table 7과 같이 요약할 수 있으며, 도막 표면상태 변화로부터 수열온도를 추정할 수 있을 것이다. 그리고 Cha *et al.*<sup>[15]</sup>은 일반중방식 도장계의 내구성능을 가열온도에 따른 색차, 부착력, 부풀음, 광택값에 근거하여 200 °C까지는 재사용 가능할 것으로 판단하였다.

**Table 7.** Surface change of heavy-duty painting systems

Temperature (°C)	Discoloration	Paint film condition
- 100	Extremely slight change	-
200	Slight change	Extremely slight change
300	Extremely marked change (darkening or yellowing)	Blistering, partial delamination
400	Blackening	Delamination
500	Whitening	Delamination
600	Whitening	Delamination

수열온도가 강재의 역학적 특성에 미치는 영향에 관한 다양한 실험적 연구<sup>[6],[10],[12]</sup>가 수행되었다. 일본건축학회 강구조내화설계지침<sup>[18]</sup>에 따르면, 일반강구조용 강재 SS400 과 용접구조용 강재 SM490의 상온시 인장강도를 유지하는 상한온도는 300 °C이며 400 °C를 초과하면 급격하게 저하한다. 그리고 고장력볼트 F10T의 경우에는 상온시 인장강도를 유지하는 상한온도는 250 °C이며 300 °C를 초과하면 급격하게 저하한다. 이에 본 연구에서는 강교량의 화재발생시, 화재진압 후 초동 대응 단계인 신속한 통행재개 여부 판단을 위한 육안조사 단계에서 일반 강재부는 400 °C, 볼트 연결부는 300 °C의 수열 여부로 판단하고자 한다.

강교량에 화재가 발생한 경우의 초동 대응 방안으로는 Fig. 14에 나타난 것과 같이 도막의 현저한 변색이 발생하지 않은 경우에는 수열온도는 200 °C 미만으로 도장의 내후성 및 강재의 안전성 저하는 발생하지 않으므로 차량통행을 재개하고 도장표면의 청소 후 보수도장 없이 재사용할 수 있을 것이다. 그리고 도막의 박리가 발생한 경우 수열온도는 300 °C 이상으로 강교량 볼트연결부의 안전성 저하가 우려되므로, 통행제한을 유지하고 긴급조치 및 안전점검을 실시하여야 할 것이다.



**Fig. 14.** The process of judging the damage degree of the steel bridge by the paint film state

도장계별로 수열온도에 따라 도막의 표면상태에 미치는 영향이 다르다. 따라서, 본 연구결과는 표준시방서(KCS 14 31 20)의 불소수지계마감, 우레탄계마감, 실록산계마감, 세라믹계마감의 일반중방식 도장계가 적용된 강교량에 적용할 수 있을 것이다. 이 이외의 종래 강교용 도장계인 조합페인트계나 염화고무계가 적용된 교량에의 적용에는 주의하여야 하며, 이와 같이 도장 표면상태변화로부터 수열온도의 추정이 곤란한 도장계가 적용된 경우에는 화재 열영향을 받지 않은 부위에서 가열에 의한 재현실험을 실시하여 수열온도를 추정할 수 있을 것이다. 이러한 재현실험의 결과는 추후 동종의 도장계에 다시 화재가 발생한 경우 수열온도 추정에 도움이 되므로 데이터베이스화 해두는 것이 중요할 것이다. 그리고 도막의 손상상태로부터 수열온도를 추정하는 방법은 현장에서 실시하는 것이 가능하지만 조사자의 주관적 판단에 따라 오차가 발생할 수 있으며, 개략적인 수열온도만 추정할 수 있다는 것에 주의하여야 한다.

#### 4. 결론

본 연구는 화재 강교량의 통행제한, 통행재개 및 긴급조치 여부에 대한 신속한 판단 지표를 제시하기 위하여 일반중방식도장계 4종류(불소수지계마감, 우레탄계마감, 실록산계마감, 세라믹계마감)를 대상으로 전기로와 가스로를 이용하여 가열온도 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C의 가열 실험을 실시하였다. 주요 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 가열온도가 200°C에서 600°C로 증가함에 따라, 강교량 일반중방식 도장계(불소수지계, 우레탄계, 실록산계, 세라믹계)의 표면상태는 200°C까지 현저한 변화가 없으며, 300°C에서 황변화, 400°C에서 흑색화, 부풀음 및 박리가 발생하며 500°C에서 백색화가 발생하였다.
- (2) 일반중방식 도장계의 광택은 가열온도가 200°C로 증가함에 따라 도장계의 종류에 상관없이 약 10% - 20% 정도 감소하였고, 300°C에서 불소수지계와 실록산계는 약 30% 정도, 세라믹계와 우레탄계는 약 30% - 80% 정도 감소하였다.
- (3) 화재 후 일반중방식 도장계의 표면상태 변화를 근거로 강교량의 수열온도를 추정할 수 있는 사진견본(Fig. 6), 색차 및 박리의 육안조사 지표(Table 7)를 제시하였다.
- (4) 일반중방식 도장계가 적용된 강교량의 화재발생시 현장 육안조사(색차, 박리여부)를 바탕으로 통행제한, 통행재개 및 긴급조치 여부에 관한 판단 지표를 제시하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020 R1A2B5B01097751).

#### 참고문헌(References)

[1] Shim, J.-W., and Shin, Y.-H. (2010) Fire Damage Evaluation on Fire Source Under the Bridge, *Magazine*

*of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.2, pp.75-78 (in Korean).

[2] Lee, J.-B., Kim, I.-K., and Cha, C.-J. (2011) Fire Damage Case and Condition Analysis About Concrete Bridges, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.23, No.3, pp.32-38 (in Korean).

[3] Jeoung, C., Kim, W., Gil, H., Lee, I., and Yun, S.-H. (2014) Fire Risk Assessment for Bridge on the Highway, *Proceedings of COSEIK Annual Conference*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.27, pp.237-241 (in Korean).

[4] Ohyama, O., Imagawa, Y., and Kurita, A. (2008) Damage Examples of Bridge Caused by Fire, *Bridge and Foundation Engineering*, Kensetsutosyo, Vol.42, No.10, pp.35-39 (in Japanese).

[5] Hong, S.-Y., Jeong, S.-Y., Baek, S.-K., and Choi, Y.-H. (2011) The Social Cost of a Fire Under Bucheon Viaduct on Seoul Ring Expressway, *Transportation Technology and Policy*, Korean Society of Transportation, Vol.8, No.1, pp.83-87 (in Korean).

[6] Kim, S.-H., Chung, K.-S., and Choi, S.-M. (2014) Residual Strength of Steel and Composite Structures Damaged by Fire, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp.34-39 (in Korean).

[7] Kim, Y.S., and Choi, B.-J. (2019) Experimental Study on the Fire Resistance of Steel-Reinforced Concrete Column in Fire According to Load Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.6, pp.459-470 (in Korean).

[8] Kim, S.-Y., Lee, J.-S., Lee, H.-D., and Shin, K.-J. (2020) Collapse Behavior of PEB Building Through Fire Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.1, pp.1-10 (in Korean).

[9] Lee, S.Y., Kang, S.D., Choi, S.K., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2006) Experimental Study on the Fire Resistance of the iTECH Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 18, No.5, pp.643-653 (in Korean).

[10] Outinen, J., and Mäkeläinen, P. (2004) Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperature and After Cooling Down, *Fire and Materials*, John Wiley & Sons, Vol.28, pp.237-251.

[11] Short, N.R., Purkiss, J.A., and Guise, S.E. (2001) Assessment of Fire Damaged Concrete Using Colour Image Analysis, *Construction and Building Materials*,

- Elsevier, Vol.15, No.1, pp.9-15.
- [12] Lee, J., Choi, K., and Hong, K. (2009) Color and Material Property Changes in Concrete Exposed to High Temperatures, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Taylor & Francis, Vol.8, No.1, pp.175-182.
- [13] Tamakoshi, T., Okubo, M., Ishio, M., and Yokoi, Y. (2012) *The Damage Evaluation Technique From the Point Appearance for the Highway Steel Bridge Heat Affected by a Fire*, Technical Note of NILIM No. 710, National Institute for Land and Infrastructure Management, Japan (in Japanese).
- [14] Cha, K.H., Park, J., Yun, S.Y., Kim, G.H., and Kim, I.T. (2020) Experimental Study on the Estimation of Fire Temperature Based on Change in Surface Condition of Steel Bridge Paints, *Journal of the Korean Society of Steel Structure*, KSSC, Vol.32, No.3, pp. 139-148 (in Korean).
- [15] Cha, K.H., Kim, G.H., Park, J.-H., Jung Y.S., and Kim I.-T. (2021) Experimental Study on the Surface Condition Change of Heavy-Duty Painted Steel by Fire Temperature, *Journal of the Korean Society of Steel Structure*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.53-62 (in Korean).
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Korean Construction Specification: Paint* (KCS 14 31 40: 2019), Korea (in Korean).
- [17] Korean Agency for Technology and Standards (2021) *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Cleanliness –Part 1: Rust Grades and Preparation Grades of Uncoated Steel Substrates and of Steel Substrates After Overall Removal of Previous Coatings* (KS M ISO 8501-1: 2021), Korea (in Korean).
- [18] Architectural Institute of Japan (2008) *Recommendation for Fire Resistant Design of Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [19] Baik, H.-S., Park, C., and Shim, J.-W. (2016) Need for Confrontational Strategy of Bridge Fire Protection with Domestic and Foreign Cases, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.64, No.7, pp.10-12 (in Korean).
- [20] Ann, H.J, Park, C.W., Kim, Y.J., Jang, Y.I., and Kong, J.S. (2017) Quantitative Fire Risk Assessment and Counter Plans Based on FDS and GIS for National Road Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.21, No.6, pp.185-195 (in Korean).
- [21] Korean Agency for Technology and Standards (2021) *Paints and Varnishes – Determination of Gloss Value at 20°, 60° and 85°* (KS M ISO 2813: 2021), Korea (in Korean).

---

**요 약**: 본 연구에서는 화재가 발생한 강교량의 수열온도를 현장 육안조사로 신속하게 추정하는 방법에 대해 실험적으로 검토하였다. 본 실험에서는 도장계별, 가열방법 및 가열온도에 따른 도막 표면상태 변화를 검토하기 위하여 표준시방서(KCS 14 31 40: 2019 도장)의 강교량 일반중방식 도장계 4종류를 대상으로 전기로와 가스로의 가열방법으로 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C의 가열실험을 하였다. 그 결과, 도장계 종류와 가열방법에 따른 표면상태 변화의 차이는 현저하지 않으며, 가열온도에 따른 도막표면상태 변화로부터 수열온도를 추정할 수 있음을 확인하였다. 그리고 화재 발생시 현장 육안조사에 의한 통행제한 및 재개 판단 지표를 제시하였다.

**핵심용어**: 강교, 화재, 일반중방식 도장계, 도막 표면상태, 육안점검, 가열실험

---