

화재온도에 의한 일반 중방식 도장계의 표면상태변화에 관한 실험적 연구

차기혁¹ · 김기혁² · 박진환³ · 정영수⁴ · 김인태^{5*}

¹차장, 부산시설공단, 교량관리처, ²석사과정, 부산대학교, 건설융합학부, ³교수, 부경대학교, 공업화학과,

⁴선임연구원, 부산대학교, 지진방재연구센터, ⁵교수, 부산대학교, 건설융합학부

Experimental Study on the Surface Condition Change of Heavy-Duty Painted Steel by Fire Temperature

Cha, Ki Hyuk¹, Kim, Gi Hyeok², Park, Jin Hwan³, Jeong, Young Soo⁴, Kim, In Tae^{5*}

¹Team Manager, Bridge Facilities Team, Busan Infrastructure Corporation, Busan, 47132, Korea

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

³Professor, Dept. of Industrial Chemistry, Pukyong University, Busan, 48547, Korea

⁴Research Engineer, Seismic Simulation Test Center, Pusan National University, Yangsan, 50612, Korea

⁵Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - When steel bridges are exposed to fire, visual inspection after extinguishing the fire is essential to check safety of the steel bridge and to immediately carry out emergency countermeasures such as stopping or passing of vehicles. In evaluation of safety, serviceability and maintenance of a steel bridge, elevated temperatures and duration time affecting the mechanical properties of steels should be estimated rapidly after the fire. In this study, heat tests are carried out to examine visually the change on the surface condition of heavy-duty paintings using an electric furnace. Steel plates are painted with four types of heavy-duty painting systems of urethane, ceramic urethane, polysiloxane, and fluorocarbon and the steel plates were subject to temperature at 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C for 30 and 60 minutes, respectively. The change in painted steel surface such as color, glossiness, adhesion, delamination and cracking was investigated depending on the temperature and duration. As a result, a visual inspection approach for estimating fire temperature and allowable temperature for weathering performance of the heavy-duty paint systems are proposed.

Keywords - Steel bridge, Fire, Heavy-duty painting, Painted surface state, Weathering performance

1. 서론

최근 국내외에서 교량의 화재발생 사례가 보고되고 있으며, 이로 인한 막대한 피해 발생 및 교량이 붕괴에 이른 사례도 보고되었다^{[1]-[4]}. 이와 같은 교량의 화재는 인명 및 시설물의 직접적인 피해뿐만 아니라, 통행차량 통제 또는 차단으로 인한 2차적인 사회적 및 경제적 손실을 유발하고 있다.

교량의 화재 발생시, 화재 온도 및 지속시간 등의 화재에 의한 수열(受熱) 정도에 따라 콘크리트 및 강재의 역학적 특성에 미치는 영향이 달라^{[4]-[8]}, 통행 재개 여부의 판단이나 보수·보강의 범위 및 방법의 결정에는 수열 정도를 신속하고 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 콘크리트 교량의 경우에는 그을음에 의한 표면의 오염, 변색이나 균열 등의 표면 상태평가로부터 수열온도 범위를 개략적으로 추정할 수 있으며, 코어시편의 콘크리트 압축강도 및 탄성계수 확인 등을 통해 보다 정량적이고 객관적으로 수열온도 범위를 추정할 수 있다^{[9],[10]}. 한편 강구조물의 경우에는 화재 후 강재의 표면상태 평가에 의한 신속한 수열온도 범위 추정 방법은 제시되어 있지 않으며, 절취 시편의 인장시험, 샤르피 충격시험, 마이크로 조직시험 등으로 수열온도 범위 추정 및 재료특성 변화를 평가하고 있다^[11].

Note.-Discussion open until August 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 31, 2020; revised January 14, 2021; approved on January 15, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. itkim@pusan.ac.kr

따라서 강교량에 화재사고가 발생한 경우, 즉각적인 차량통행 제한이나 벤트 설치 등의 긴급조치 실시 여부를 신속하게 판단하기 위한 신속한 수열온도 범위 추정법이 필요하다. 그리고 강교량은 도장에 의해 피복 방식처리되어 있어, 강재 표면에 피복되어 있는 도장의 표면상태 평가에 의한 수열온도 범위 추정법에 대한 검토가 필요하다. 또한 화재에 의해 열영향을 받은 도장의 재사용, 보수도장 여부 및 범위를 결정하기 위하여 수열정도에 따른 도장의 내후성능 평가 및 도장의 재사용이 가능한 한계 수열온도에 대한 검토가 필요하다.

이에 저자는 전기로 실험을 통하여 강교 도장의 표면상태 변화를 이용하여 수열온도의 추정이 가능함을 확인하였다^[12]. 본 연구에서는 일반 중방식 도장계의 상도 색상을 다양하게 하고 시편 수를 증가시키고 가열온도의 세분화, 부착력 측정을 추가하여 도장표면상태 변화에 의한 수열온도 추정법의 적용성 및 신뢰성 향상을 위하여 추가 실험을 수행하였다. 그리고 화재가 발생한 강교량 도장의 재사용 여부에 대해서도 검토하였다.

본 실험에서는 표준시방서(KCS 14 31 40: 2016 도장)^[13]의 강교량용 일반 중방식계열인 우레탄계마감, 세라믹계우레탄마감, 실록산계마감 및 불소수지계 마감의 4종류 도장시편을 제작하여, 전기로 가열시험(가열온도 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C와 가열 지속시간 30분, 60분간)을 실시하였다. 그 결과 가열온도 및 지속시간에 따른 4종류 중방식 도장계의 표면상태 변화를 검토하여, 화재시 수열온도 추정을 위한 평가 지표로서 온도별, 지속시간별 일반 중방식 도장계의 표면상태 변화 사진을 제시하였다. 그리고 도장의 재사용이 가능한 수열온도 범위에 대해서도 검토하였다.

2. 가열실험

2.1 도장시편 제작

본 실험에서는 두께 3 mm의 SS275 강판에서 70 mm × 150 mm로 절단한 소형 강판 시편을 블라스트 표면처리(Sa 2 1/2)^[14]한 후 표준시방서(KCS 14 31 40: 2016 도장)에 준하여 강교용 일반 중방식 계열인 우레탄마감, 세라믹계우레탄마감, 실록산계마감 및 불소수지계마감의 4종류 도장계로 도포하였다. 이하, 각각 우레탄계, 세라믹계, 실록산계, 불소수지계라 칭하며, U, C, S, F로 표기한다.

SS275 강재의 밀시트상의 재료 특성 및 화학성분을 각각 Table 1 및 Table 2, 도장 사양은 Table 3에 나타내었으며, 최종 제작된 도장시편의 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%)

C	Si	Mn	P	S
0.150	0.100	0.390	0.014	0.007

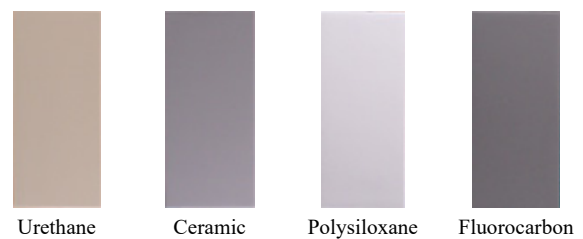


Fig. 1. Painted test specimens

Table 3. Painting system of specimens

Symbol	Painting type (Type I)	Painting layer			Designed film thickness (μm)
		1st	2nd	3rd	
U	Urethane	Epoxy primer (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Urethane (80 μm)	255
C	Ceramic	Ceramic protective paint (75 μm)	Ceramic protective paint (100 μm)	Ceramic urethane (80 μm)	255
S	Polysiloxane	Epoxy primer (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Polysiloxane (80 μm)	255
F	Fluorocarbon	Epoxy primer (75 μm)	High solid epoxy (100 μm)	Fluorocarbon (50 μm)	225

2.2 전기로 가열실험 조건

4종류의 일반 증방식 도장계 시편의 전기로에 의한 가열 온도 및 가열 지속시간의 범위는 Table 4에 나타난 것과 같이 가열온도 100 °C에서 300 °C까지 50 °C 간격으로 하였으며, 가열온도의 지속시간은 30분과 60분으로 하였다. 그리고 가열온도 400 °C에서 600 °C까지는 100 °C 간격으로 지속시간은 30분으로 하였다.

일반 증방식 도장계별 시편수는 가열온도 100 °C에서 300 °C까지의 지속시간 30분의 경우에는 각각 6개씩, 지속시간 60분의 경우에는 각각 7개씩이다. 그리고 가열온도 400 °C에서 600 °C까지는 도장계별 각각 시편 1개씩을 가열 시험하였다.

Table 4. Total number of test specimens

Temperature (°C)	Duration time (minute)							
	30				60			
	U	C	S	F	U	C	S	F
100	6	6	6	6	7	7	7	7
150	6	6	6	6	7	7	7	7
200	6	6	6	6	7	7	7	7
250	6	6	6	6	7	7	7	7
300	6	6	6	6	7	7	7	7
400	1	1	1	1	-			
500	1	1	1	1	-			
600	1	1	1	1	-			

2.3 화재를 모사한 전기로 가열실험

본 실험에서는 화재 발생시의 다양한 화재 온도와 지속시간의 화재강도를 모사하기 위하여 전기로를 이용하여 가열 시험을 실시하였다.

전기로를 이용한 가열실험은 먼저 목표 온도까지 전기로 체임버 내의 온도를 상승시키고, 목표 온도에 도달하면, 체임버 도어를 개폐하여 시편을 설치하고 30분 또는 60분간 가열하였다.

체임버 내에 시편을 설치하기 위하여 체임버 도어를 개폐할 경우, 체임버 내 온도가 일시적으로 저하하게 된다. 본 실험에 사용 전기로는 체임버 내의 온도가 설정 목표 온도로 회복되는 시간은 약 10분으로 측정되어, 가열온도의 지속시간 30분과 60분의 시험은 설정 온도 회복시간을 고려하여 시편 투입 후 각각 40분과 70분간 가열하였다.

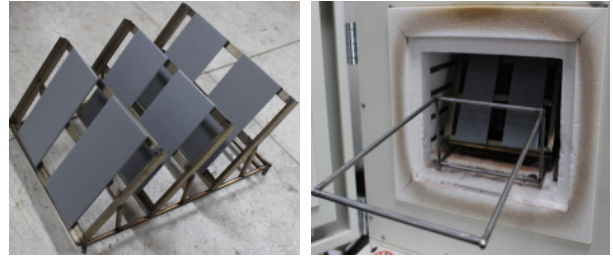


Fig. 2. Test setup

2.4 도장의 상태평가 및 내구성능 평가

국토교통부의 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가편)에 따르면, 도장과 관련된 강재의 성능은 상태안전성능과 내구성능으로 분류하여 평가할 수 있다^[15].

상태안전성능은 부식발생 면적율과 부식에 의한 단면손상 면적율에 근거하여 평가하며, 강재 내구성능은 발청과 도장의 박리, 균열, 부풀, 변색/백아화의 4가지 도장열화 및 도장두께에 근거하여 평가된다.

본 실험에서는 화재강도에 따른 도장의 내구성능을 평가하기 위하여 4가지의 도장열화, 도장두께, 그리고 세부지침에는 규정되어 있지 않지만, 도장의 열화 평가에 널리 사용되고 있는 도막의 부착력 및 광택도를 측정하여 강구조물용 일반 증방식 도장계의 내구성능을 평가하였다. 즉 가열시험 전·후의 시편 표면의 육안조사에 근거하여 도장열화를 평가하고, 색차, 광택도 및 부착력을 측정하여 도장 내구성능을 정량적으로 평가하였다.

색차, 광택도 및 부착력은 시편을 상부, 중간부, 하부로 분류하여, 각 부위별로 3회씩 측정하고 이를 평균하여 각 시편의 색차, 광택도 및 부착력을 산출하였다.

3. 가열실험 결과

3.1 도막의 표면상태 평가

가열온도와 지속시간에 따른 시편의 표면상태 변화를 Fig. 3과 Table 5에 정리하였다. 먼저 우레탄계(U)의 경우, 가열온도가 증가함에 따라 200 °C에서 변색되기 시작하여, 250 °C에서 뚜렷하게 변색되었다. 그리고 250 °C에서는 표면 전체에 걸쳐 도막 부풀이 발생하였으며, 300 °C에서 도막의 부풀, 균열 및 박리가 현저하게 발생하였다.

한편 각 가열온도의 지속시간 30분, 60분에 따른 변색 또는 도막 박리의 현저한 차이는 확인되지 않았다.

Symbol	Duration time (min)	Temperature (°C)								
		Initial	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
U	30									
	60							-	-	-
C	30									
	60							-	-	-
S	30									
	60							-	-	-
F	30									
	60							-	-	-

Fig. 3. Surface condition according to temperature and duration time

세라믹계(C), 실록산계(S) 및 불소수지계(F) 도장의 경우에는 250 °C에서 미미하게 변색되었으며, 300 °C에서 뚜렷하게 변색되었다. 그리고 300 °C에서는 부분적으로 도막 박리가 발생하였으며, 400 °C에서는 도막 박리가 표면전체에 걸쳐 현저하게 발생하였다. 그리고 각 가열온도의 지속시간

30분, 60분에 따른 변색 또는 도막 박리의 현저한 차이는 확인되지 않았다.

Fig. 4에 나타낸 것과 같이 도막의 표면상태에 대한 육안조사에 추가하여 20배율 확대경을 이용하여 가열온도 150 °C - 300 °C의 4종류 도장계의 표면상태를 확인하였다.

Table 5. Change in surface condition

Symbol	Surface condition	Temperature and duration time (minute)															
		100 °C		150 °C		200 °C		250 °C		300 °C		400 °C		500 °C		600 °C	
		30	60	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60	30	60
U	Discoloration	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Delamination	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
C	Discoloration	○	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×
	Delamination	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×
S	Discoloration	○	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×
	Delamination	○	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×
F	Discoloration	○	○	○	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×
	Delamination	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×

○: extremely slight change, △: marked change, ×: extremely marked change

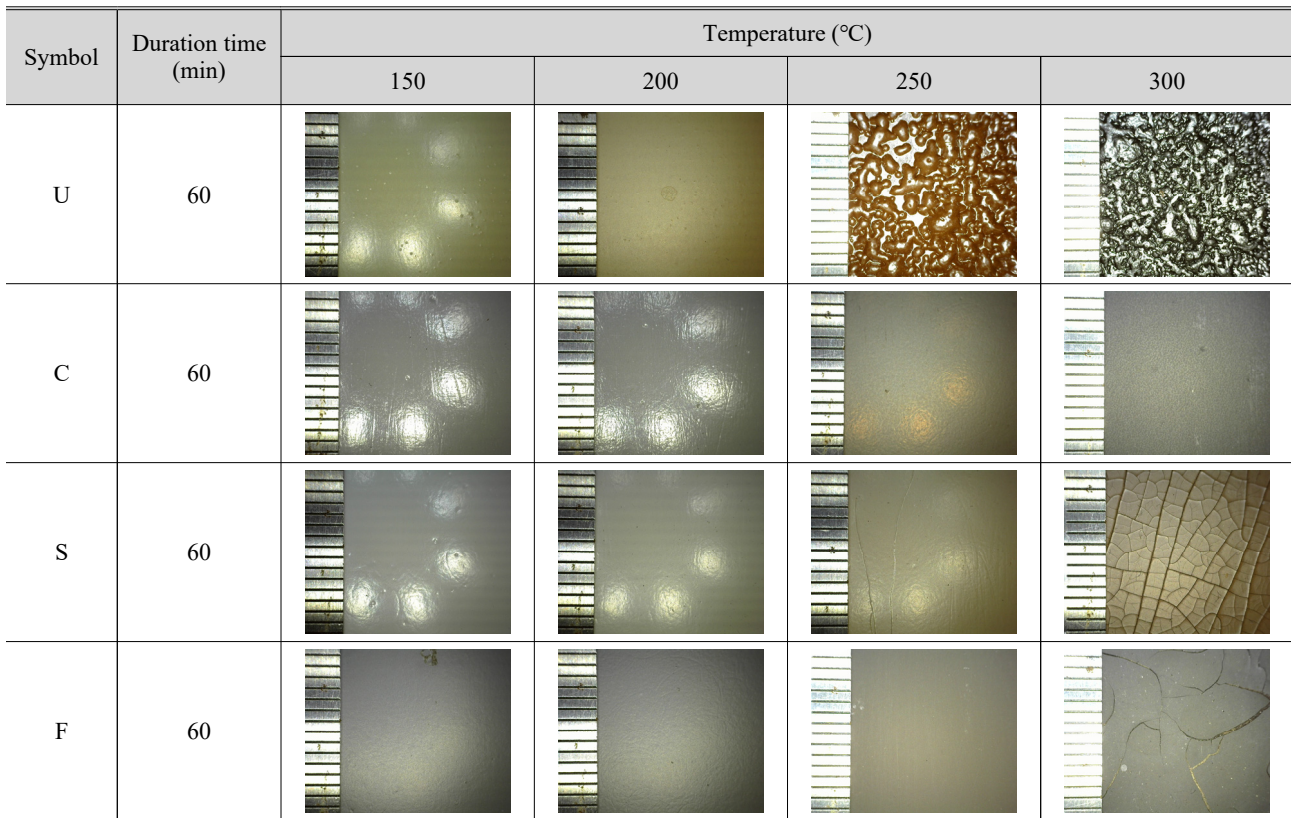


Fig. 4. Magnified surface condition (×20)

그 결과, 우레탄계(U)는 200 °C까지는 특이점이 확인되지 않았으며 250 °C에서는 표면 전체에 걸친 부품 발생이 확인되었다. 실록산계(S)의 경우, 250 °C에서 도막 균열이 확인되었고 300 °C에서는 표면 전체에 걸쳐 망상균열이 발생하였다. 그리고 불소수지계(F)의 경우, 250 °C까지는 특이점이 확인되지 않았으며, 300 °C에서 표면전체에 걸쳐 도막 박리가 발생하였고, 세라믹계(C)의 경우 250 °C까지는 특이점이 없으며, 300 °C에서 도막 균열 발생 징후가 확인되었다.

4종류의 도장계에 대한 가열온도 및 지속시간에 따른 변색 및 도장박리를 Table 6과 같이 간략하게 정리할 수 있으며, 강교용 일반 증방식 도장계는 가열온도 250 °C에서 변색이 현저하게 발생하며, 300 °C에 탄화(탄소 함유물이 가열 분해되면서 탄소만 남는 상태에서 흑색으로 변화된 현상)가 발생하였다. 그리고 가열온도 250 °C - 300 °C에서는 도막의 균열, 부품 및 박리가 현저하게 발생함을 확인하였다.

Table 6. Discoloration and delamination

Surface condition	Symbol	Temperature (°C)					
		100	150	200	250	300	≥ 400
Discoloration	U	○	○	△	×	×	×
	C, S, F	○	○	○	△	×	×
Delamination	U	○	○	○	×	×	×
	S	○	○	○	△	×	×
	F	○	○	○	○	×	×
	C	○	○	○	○	△	×

3.2 도막의 광택도

가열온도와 지속시간에 대한 도장 표면상태변화 및 열화정도를 정량적으로 평가하기 위하여 가열시험 전·후의 도장 표면의 광택도, 색차 및 부착력을 측정하였다. 단, 전술한 바와 같이 가열온도가 증가함에 따라 도막의 박리가 발생하여 측정이 불가능한 우레탄계(U)와 불소수지계(F) 시편에 대해서는 각각 200 °C, 250 °C까지, 실록산계(S) 및 세라믹계(C) 시편은 300 °C까지만 측정하였다.

가열온도에 따른 초기시편의 광택도에 대한 가열후 시편의 광택도의 비를 광택보유율(%)로 하여, 이를 가열온도에 대한 변화로 Fig. 5에 나타내었다. 단 각 가열온도의 지속시간 30분과 60분에 따른 광택보유율의 차이는 뚜렷하지 않아, 이를 평균하여, 각 가열온도에 대한 각 도장계의 광택보유율로 나타내었다.

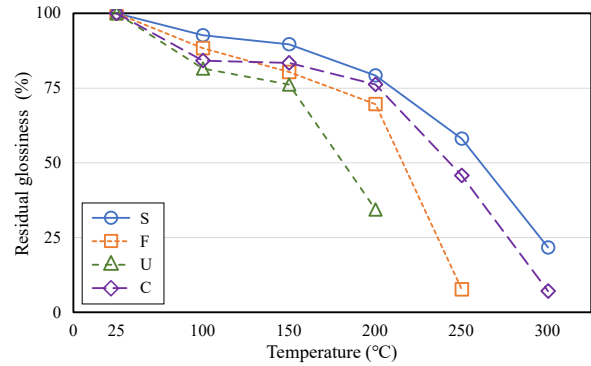


Fig. 5. Residual glossiness

Fig. 5에 나타난 것과 같이 광택보유율은 가열온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 우레탄계(U)는 150 °C에서, 불소수지계(F), 실록산계(S)와 세라믹계(C)는 200 °C에서 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 가열온도에 따른 도장계의 광택보유율을 비교하면 각 가열온도에 대해 실록산계가 가장 높고, 그 다음으로 세라믹계, 불소수지계, 우레탄계의 순으로 확인되었다.

3.3 도막의 색차

색차계를 이용하여 가열시험 전·후 시편 표면의 동일 위치에서의 L^* , a^* , b^* 을 측정하고 이를 식 (1)에 대입하여 색차 (ΔE^*)를 계산하였다^[16]. 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 흰색과 검정의 관계를 나타내고, a^* 값은 빨강(+)과 초록(-)과의 관계, b^* 값은 노랑(+)과 파랑(-)과의 관계를 나타낸다. 그리고 Δ 는 가열 시험 전과 후의 변화량을 나타낸다.

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

각 도장계의 가열온도에 따른 색차(ΔE^*)를 Fig. 6, ΔE^* 및 NBS 등급을 Table 7에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 것과 같이 색차는 온도가 150 °C까지 증가함에 따라 서서히 증가하고, 200 °C부터 급하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 도장계의 종류에 따른 색차를 비교하면, 200 °C에서 불소수지계, 세라믹계, 실록산계, 우레탄계 순으로 크게 발생하였다.

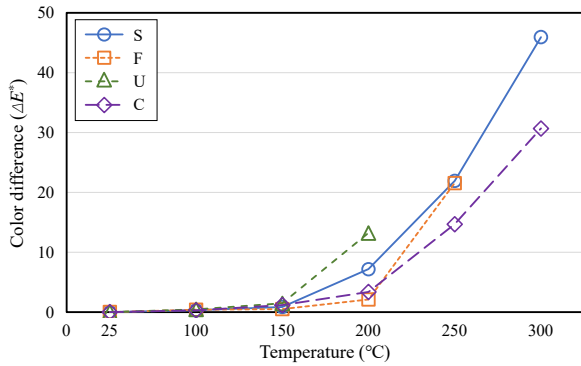


Fig. 6. Color difference

Table 7. 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)	

각 도장계의 색차를 가열온도와 지속시간에 대해 NBS rating을 초기에 비해 거의 변화가 없음(○), 초기에 비해 변색되어 있음(△), 초기의 색이 거의 남아 있지 않음(×)의 3등급으로 분류하여 Table 8에 나타내었다. 200 °C에서 변색 정도가 크고, 250 °C부터는 초기의 색이 거의 남아 있지 않고 다른 색으로 변색한 것을 확인할 수 있다.

Table 8. Color difference

Surface condition	Symbol	Temperature (°C)				
		100	150	200	250	300
Color difference	U	○	○	×	×	×
	S	○	○	△	×	×
	F	○	○	△	×	×
	C	○	○	○	×	×

3.4 도막의 부착력

각 도장계별로 가열온도 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C의 지속시간 60분 시편 1개씩을 선정하여 pull-off test

로 도막의 부착력을 측정하였다^[17]. 우레탄계(U)와 불소수지계(F)는 각각 250 °C, 300 °C에서 상도 도막의 부풀이 발생하여 부착력 측정에서 제외하였으며, 부착력은 시편 1개당 2점에서 측정하고 이를 평균하여 각 도장계별 평균 부착력을 산출하였다.

Table 9에 나타난 것과 같이 가열 전과 후의 도막의 부착력을 비교하면, 가열에 의해 부착력이 증가하는 경향을 보이며, 이는 열에 의한 추가 경화반응에 의한 것으로 추정된다. 그리고 가열온도에 의해 도막의 부풀 또는 박리가 발생하지 않은 경우에는 열충격에 의한 일반 중방식 도장계의 부착력 감소는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Adhesion of paint film

Symbol	Average adhesion (MPa)					
	Initial	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
U	4.26	4.38	5.35	5.23	-	-
S	3.87	4.09	5.59	5.63	5.12	4.66
C	4.31	3.91	4.28	5.07	5.60	4.59
F	5.17	5.17	6.33	7.25	6.06	-

3.5 도장 표면상태를 이용한 화재온도 추정 및 화재대응에의 활용

화재 발생시 강재의 역학적 특성은 화재(수열)온도 및 지속시간의 영향을 받게 되며, 이에 관한 다양한 실험적 연구가 수행되어 왔다^{[4],[11],[18]}.

예를 들어, 일본건축학회 강구조내화설계지침^[18]에 따르면, 일반강구조용 압연강재 SS400과 용접구조용 압연강재 SM490의 인장강도가 상온시의 값을 유지하는 상한온도는 300 °C로 규정하고 있다. 즉 이들 강재온도가 300 °C까지 상승한 상태에서도 상온시의 인장강도를 유지하고 400 °C를 초과하면 급격하게 저하한다. 그리고 고장력볼트 F10T와 S10T의 경우에는 250 °C까지 상온과 동일한 인장강도를 유지하고 300 °C를 초과하면 급격하게 저하한다. 따라서 구조용 압연강재와 고장력볼트는 화재발생시 각각 수열온도 300 °C와 250 °C까지는 상온과 동일한 인장강도를 유지한다고 할 수 있다.

강교량의 화재발생시, 화재진압 후 신속한 공용재개 여부 판단을 위한 육안조사 단계에서 수열온도는 일반 강재부 400 °C, 볼트 연결부 300 °C의 초과 여부로 판단할 수 있을 것이다. 이러한 수열온도는 강교용 일반 중방식 도장계의

표면상태 변화, 즉 변색 및 박리 발생 여부에 따라 추정할 수 있다. 즉 Table 5, Table 6, Table 8에 나타낸 것과 같이 일반 중방식 도장계는 가열온도 300 °C - 400 °C에서 탄화 및 박리가 발생하였다. 따라서 화재 발생 후 도장 표면의 탄화가 발생한 경우에는 강재의 인장강도의 저하가 우려되므로, 통행을 제한하고 정밀안전진단을 실시하여 강교량의 구조 안전성능, 사용성능에 대한 상세 검토가 필요한 것으로 판단된다. 그리고 화재 발생 후 탄화와 박리가 발생하지 않은 경우에는 수열온도를 300 °C 미만으로 추정할 수 있어, 통행을 재개한 상태에서 정밀점검 등의 상세 검토를 수행할 수 있을 것이다.

3.6 화재온도에 따른 도장의 내구성능 평가

화재 발생 후, 도장의 재사용 여부는 열에 대한 도장의 내구성능에 근거하여 판단할 수 있을 것이다.

앞에서 기술한 바와 같이, 가열온도 300 °C부터 탄화가 발생하여 이를 제외하고 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C에 대한 도장의 내구성을 평가하였다. Table 10에 나타낸 것과 같이, 육안 및 색차계에 의한 변색 정도, 부착력, 균열/박

리, 광택보유율에 근거하여 각 도장계의 내구성능을 3단계로 평가하였다. 본 실험에서 가열실험 전과 후의 도막 두께도 측정하였으나, 가열온도에 따른 도막두께 변화는 확인되지 않아 내구성능 검토에서 도막두께는 고려하지 않았다.

일반 중방식 도장계의 내구성능을 가열온도에 따른 색차, 부착력, 부푼, 광택도에 근거하여 평가하면 Table 10과 같이 나타낼 수 있다. 일반 중방식 도장계 중에서 우레탄계(U)가 가장 낮으며 화재온도 150 °C까지는 재사용이 가능한 것으로 판단된다. 그리고 실록산계(S), 세라믹계(C) 및 불소수지계(F)는 화재온도 200 °C까지는 재사용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 화재 발생 후, Fig. 3와 Table 5를 이용한 육안점검을 통해 화재온도를 추정하고, Table 10을 평가지표로 활용하면 도장의 재사용 여부의 판단이 가능할 것이다.

4. 결론

본 연구는 화재 후의 도장 표면상태로부터 화재(수열) 온도 추정 및 일반 중방식 도장계의 화재 후 재사용을 위한 한계 수열온도 추정을 위한 실험적 연구로서 표준시방서(KCS 14 31 40: 2016 도장)의 일반 중방식 도장계 4종류(우레탄계마감, 세라믹계우레탄마감, 실록산계마감, 불소수지계마감)를 대상으로 전기로를 이용하여 가열온도 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C와 지속시간 30분, 60분간의 전기로 가열실험을 실시하였다. 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 가열온도가 100 °C에서 600 °C까지 상승함에 따라, 일반 중방식 도장계는 200 °C - 250 °C에서 변색이 발생하였으며, 300 °C - 400 °C에서 탄화가 발생하였다. 그리고 250 °C부터는 부분적으로 도막의 박리와 균열이 발생하였으며, 300 °C - 400 °C에서는 도막의 상도가 박리되었다.
- (2) 가열온도의 지속시간 30분과 60분에 따른 일반 중방식 도장계의 변색, 박리, 광택도 및 색차의 현저한 차이는 발생하지 않았다. 따라서 도막의 표면상태 변화 정도는 화재 지속시간의 영향은 적으며 주로 화재 온도에 영향을 받는다는 것을 확인하였다.
- (3) 일반 중방식 도장계의 내구성능을 가열온도에 따른 색차, 부착력, 균열/박리, 광택보유율에 근거하여 평가하면, 우레탄계는 화재온도 150 °C까지, 실록산계,

Table 10. Durability of heavy-duty painted steel

Symbol	Surface condition	Temperature (°C)				
		100	150	200	250	300
U	Color difference	○	○	×	×	×
	Adhesion	○	○	○	-	-
	Delamination	○	○	○	×	×
	Glossiness	○	○	×	×	×
S	Color difference	○	○	△	×	×
	Adhesion	○	○	○	○	○
	Delamination	○	○	○	△	×
	Glossiness	○	○	○	×	×
C	Color difference	○	○	△	×	×
	Adhesion	○	○	○	○	○
	Delamination	○	○	○	○	△
	Glossiness	○	○	○	×	×
F	Color difference	○	○	○	×	×
	Adhesion	○	○	○	×	-
	Delamination	○	○	○	○	×
	Glossiness	○	○	○	×	×

세라믹계 및 불소수지계는 화재온도 200 °C까지는 뚜렷한 내구성능 저하가 발생하지 않아 재사용이 가능할 것으로 판단된다.

- (4) 일반 중방식 도장계의 가열온도에 따른 표면상태변화는 강교량의 화재온도 및 범위 추정을 위한 육안점검의 지표로서 차량통행 제한/재개 여부 판단, 보수/보강의 범위 및 방법 결정 등의 신속한 강교량 화재대응에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

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] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Cha, K.H., Park, J.H., Yeon, 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] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Korean Construction Specification: Paint* (KCS 14 31 40: 2016), Korea (in Korean).
- [14] Korean Agency for Technology and Standards (2008) *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints and Related Products: Visual Assessment of Surface Cleanliness* (KS M ISO 8501-1: 2008), Korea (in Korean).
- [15] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (2018) *Detailed Guideline for Facility Safety Management and Maintenance (Performance Assessment)*, KALIS, Korea (in Korean).
- [16] Al Qahtani, M.Q., and Binsufayyan, S.S. (2011) Color Change of Direct Resin-Based Composites After Bleaching: An in vitro Study, *King Saud University*

- Journal of Dental Sciences*, Elsevier, Vol.2, pp.23-27.
- [17] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Paint and Varnishes: Pull off Test for Adhesion* (KS M ISO 4624: 2016), Korea (in Korean).
- [18] Architectural Institute of Japan (2008) *Recommendation for Fire Resistant Design of Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).

요 약: 강교량에 화재가 발생하면, 차량통행을 제한하고 화재진압 후 육안점검을 통한 통행재개 및 긴급조치 여부에 대한 신속한 판단이 요구된다. 강재는 화재온도와 지속시간에 따라 기계적 특성이 다르며, 화재후 강교량의 안전성능, 사용성능 평가 및 보수보강 범위 등의 결정에는 화재온도와 지속시간의 추정이 중요하다. 본 연구는 화재진압 후 육안조사로 화재(수열)온도를 신속하게 추정할 수 있도록 화재 손상된 도장의 표면상태로부터 화재온도를 추정하는 방법에 대해 검토하였다. 본 실험에서는 강구조물의 일반 증방식 도장계 4종류(우레탄계, 세라믹계, 실록산계, 불소수지계)를 대상으로 전기로를 이용하여 가열온도 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C와 가열 지속시간 30분, 60분간의 가열실험을 실시하였다. 그 결과 가열온도와 지속시간에 따른 일반 증방식 도장계의 표면상태 변화를 통해 가열온도를 추정할 수 있음을 확인하였고, 화재 후의 일반증방식 도장계의 재사용 가능 온도를 검토하였다.

핵심용어: 강교, 화재, 일반 증방식 도장계, 도장표면상태, 내후성능
