화재손상된 콘크리트의 변색상태 판별을 통한 수열온도 추정 방법의 문제점 분석

Analysis of Problems in the Heating Temperature Estimation Method by Discoloration of Fire-Damaged Concrete

강 현* · 권오상**

Kang, Hyun*, and Kweon, Oh Sang**

Abstract

In this study, a material heating test was carried out and the results were analyzed. Various variables were employed to identify the limitations of the concrete discoloration discrimination method, a method for estimating the heating temperature. The material heating specimens did not use admixture additives, and various design compressive strengths were employed. After the heating experiment, surface color analysis was performed on the cooled specimens to quantitatively analyze the discoloration state of the concrete according to the exposure temperature. As a result, it was judged that the currently used concrete discoloration discrimination method is inadequate for estimating the heating temperature. Moreover, it was confirmed that the development of a new heating temperature estimation method is necessary.

Key words : Fire, Heating Test, Heating Temperature, Concrete, Discoloration

요 지

이 연구에서는 수열온도 추정방법의 하나로써 가장 널리 사용되고 있는 콘크리트 변색상태 판별법의 문제점을 파악하기 위하여 다양한 변수를 설정하여 재료가열시험 및 결과분석을 수행하였다. 재료가열시험체는 혼화재를 사용하지 않았으며, 다양한 설계압축강도를 갖는 콘크리트 공시체를 사용하였다. 가열시험을 실시한 후, 냉각된 실험체를 대상으로 표면 색조분석을 통하여 화재노출온도에 따른 콘크리트의 변색상태를 정량적으로 분석하였다. 그 결과 현재 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트 변색상태 판별법은 수열온도를 추정하기 위한 방법으로써 부적절하다고 판단하였으며, 새로운 수열온도 추정방법의 개발의 필요성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 화재, 가열시험, 수열온도, 콘크리트, 변색

1. 서 론

건축물에 발생하는 화재는 화염 및 연기 등과 같이 화재로 인한 직접적인 1차 피해와 피해 복구기간동안 소요되는 경제적 손실 및 주거공간, 업무공간 및 사회기반시설 등의 부재로 발생하는 2차 피해를 유발하게 된다(Kang, 2018).

1차 피해는 구조물의 내화성능보강, 소방 설비 보완 등을 통하여 피해를 최소화 할 수 있으며, 2차 피해의 경우에는 신속하고 합리적인 피해 진단과 그 결과를 통하여 피해규모에 적절한 복구방안 및 복구절차에 따라 최소화 할 수 있다. 그러나 2차 피해를 최소화 할 수 있는 화재손상된 건축물의 진단방법은 현재 정성적 평가방법과 정량적 평가방법을

*정회원, 공학박사, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원(E-mail: kanghty@kict.re.kr)

Member, Ph.D., Research Specialist, Fire Research Institute, KICT

**교신저자, 정회원, 공학박사, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(Tel: +82-31-369-0546, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: oskweon@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Senior Researcher, Fire Research Institute, KICT

통하여 평가자의 경험적 판단에 의하여 수행되고 있다는 문제점이 있다(Kang, 2018).

화재손상된 건축물의 진단과정에서 가장 중요한 요인은 화재 시 건축물에 직접적으로 작용한 수열온도로써, 수열온도에 따라 구조물의 성능저하 규모가 크게 달라지기 때문이다. 수열온도의 추정에는 콘크리트 변색상태 판별법, UV 스펙트럼법, X선 회절법 및 탄산가스 재 흡수량 측정법 등을 통하여 수행할 수 있다고 알려져 있다(BRE, 1950; AIJ, 1983; ACI, 2008; Hager, 2014; Kang, 2018; Kang et al., 2019). 여기에서 콘크리트 변색상태 판별법은 사고현장에서 별도의 시료준비 및 시료테스트 등의 과정 없이 평가자가 육안으로 평가할 수 있는 방법으로써 상대적으로 용이한 추정방법으로 널리 사용되어 왔다(Hager, 2014; Kang, 2018; Kang et al., 2019).

다만, 콘크리트 변색상태 판별법은 평가자의 육안을 통하여 진단이 이루어지기 때문에 Fig. 1과 같이 콘크리트의 변색상태가 명확히 판단되지 않은 상황에서 평가자에 따라 각기 다른 판단을 할 수 있다. 이와 같이 평가자의 주관적인 판단에 따른 수열온도 추정결과를 활용하게 된다면, 실제 피해규모와는 전혀 다른 진단결과를 도출할 수 있다는 문제점이 있다. 또한, 실제 화염의 온도와 전혀 다른 수열온도 추정결과가 도출 된다면, 피해자의 2차 피해는 더욱 가중될 수 있다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트 변색상태 판별법의 문제점을 정량적으로 분석하기 위하여 콘크리트 재료가열 시험을 실시하였으며, 고온 손상된 실험체를 대상으로 정량적인 색조분석을 실시하였다.

2. 콘크리트 변색상태 판별법을 통한 수열온도 추정방법

육안검사를 통하여 수열온도를 추정하는 콘크리트 표면 변색상태 판별법은 Table 1과 같이 일반적으로 널리 알려져 있는 화재노출 온도범위에 따른 콘크리트 변색상태에 따라 수열온도를 판단하는 방법이다. 이는 매우 간편한 수열온도 추정 방법으로써 화재사고 현장에서 구조부재에 부착된 그물음을 제거 한 후 육안을 통하여 용이하게 수열온도를 추정할 수 있다는 특징을 가지고 있어 국내·외에서 일반적으로 사용되고 있다(BRE, 1950; AIJ, 1983; ACI, 2008; Hager, 2014; Kang, 2018; Kang et al., 2019). 다만, 육안검사를 통하여 진행되기 때문에 평가자의 경험적 판단에 따라 각기 다른 수열온도 추정결과를 도출할 수 있으며, 콘크리트 배합에 사용되는 혼화재 사용유무 등에 따라 평가자가 변색상태를 판별하지 못할 수 있다는 대표적인 문제점을 가지고 있다. 또한, Fig. 1과 같이 실제 화재노출온도에 따른 변색상태가 Table 1에서 제시하고 있는 수열온도에 따른 변색상태인 “핑크” 색과는 전혀 다른 변색상태를 나타낼 수 있다. 여기에서 Fig. 1은 혼화재가 사용되지 않은 일반적인 레미콘

회사에서 널리 사용되는 배합을 통하여 제작된 콘크리트 공시체를 500 ℃로 가열시험을 실시 한 후의 모습이다.

Table 1. Concrete Discoloration according to Heating Temperatures (AIJ, 1983)

Discoloration	Temperature (℃)
Sooty	Less than 300
Pink	300 ~ 600
Light Gray	600 ~ 950
Light Yellow	950 ~ 1,200
Concrete Melting	More than 1,200

Fig. 1. Concrete Discoloration after Heating to 500 ℃

3. 콘크리트 가열시험을 통한 색조분석

3.1 콘크리트 재료가열시험

이 연구에서는 화재피해를 입은 콘크리트의 수열온도 추정방법 중 일반적으로 널리 사용되고 있는 콘크리트 변색상태 판별법의 문제점을 분석하기 위하여 Table 2와 같은 배합의 콘크리트 시험체를 제작하여 재료가열시험을 실시한 후, 냉각된 시험체를 대상으로 표면 색조분석을 실시하고자 하였다. 콘크리트 재료가열시험은 Table 3과 같이 4가지의 설계압축강도를 갖는 콘크리트 공시체를 대상으로 7가지의 목표가열온도를 설정하여 실시하였다. 가열속도는 5 ℃/min으로 설정하였으며, 가열로의 내부 평균온도가 목표가열온도에 도달 한 후 2시간 동안의 가열 지속시간을 두고 종료하였으며, 가열이력곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Figs. 2(a) 및 (b)의 시험체는 온도측정 장비의 오작동으로 인하여 온도측정이 초기에 종료되어 냉각 시간동안의 온도이력 일부가 누락되었다.

Table 2. Mixture Proportions of Concrete

Design Strength (MPa)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse (kg/m ³)
24	170	335	870	956
30	169	392	825	952
50	171	580	695	920
55	146	632	681	922

Table 3. Test Variables and Specimens

No.	Compressive Strength (MPa)	Number of Specimens	Target Temperature (°C)
1	24	21/each test	ambient
2	30		200
3	50		400
4	55		500
			600
			700
			800

3.2 콘크리트 표면 색조분석

일반적으로 사용되고 있는 콘크리트 표면 변색상태 판별법은 평가자의 육안을 통하여 이루어지는 분석법으로써, 평가자의 주관적인 견해로 인한 오판 및 정량적인 분석결과 확보의 어려움 등의 문제점이 있다. 따라서 이 연구에서는 가열 후 상온상태까지 냉각된 콘크리트 실험체를 대상으로 변색상태 분석을 위하여 분광광도계를 사용하여 정량적인 색조분석을 수행하였다. 분광광도계는 정량적인 색상성분 분석을 통하여 도장, 문화재복원 분야를 비롯한 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는 장비로써 특정 색상을 대상으로 표색계의 다양한 구성요소에 대한 정량적인 측정값을 제공할 수 있다(Lee et al., 2006; Lee, 2014). 이 연구에서는 분광광도계의 측정방법에 따라 측정대상에 장비를 밀착하여 측정 시 외부 조도에 영향을 받지 않도록 콘크리트 공시체의 평평한 부분인 상단부를 대상으로 색조분석을 실시하였다. Fig. 3은 다양한 목표온도에 노출된 콘크리트 실험체 표면의 색상성분을 L*a*b* 표색계 성분으로 나타낸 색조분석 결과로써, 노출온도에 따라 각기 다른 측정값을 나타내는

Fig. 2. Air Cooling Specimens Temperature Historic Curves (Kang and Kweon, 2020)

(a) Compressive strength: 24 MPa specimen

(b) Compressive strength: 30 MPa specimen

(c) Compressive strength: 50 MPa specimen

(d) Compressive strength: 55 MPa specimen

Fig. 3. Colorimetric Analysis Results as L*a*b* Color System

것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 L*a*b* 표색계에서 L*값은 명도를 나타내는 지수로써, 0 (Black) 부터 100 (White)까지의 수치로 나타낸다. a*, b*값은 색상과 채도를 나타내는 지수로써, 각각 -60 (a*: Green, b*: Blue) ~ +60 (a*: Red, b*: Yellow) 값 범위로 나타낼 수 있다. 다만, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 화재노출온도에 따라 콘크리트 표면의 표색계 성분 값이 뚜렷한 경향성을 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. Figs. 3의 (a)~(e)에서 b* 지수 데이터는 L*, a*지수와는 다르게 상대적으로 고온에 노출 될수록 지수값이 상승하는 경향을 나타내고 있으나, Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 화재에 손상된 실험체의 표면

색상이 화재손상을 입지 않은 실험체와 비교하였을 때 500 °C 이상의 고온 실험체 표면의 색상변화가 어떻게 발생되었는지 육안으로 판단하기 매우 어려운 상태라는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 실험 및 측정결과는 Table 1에서 제시된 핑크색을 띄는 수열온도 범위(300~600 °C)와는 크게 다른 결과로써, 육안조사를 통하여 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트 변색상태 판별법이 실제 화재피해를 입은 콘크리트의 수열온도 추정방법으로써 적절하지 않다는 것을 반증하고 있다. 또한, Fig 3에 따라 b* 지수값을 활용하여 수열온도를 추정하는 방법은 국내의 콘크리트 배합에서 일반적으로 사용되는 시멘트 대체 재료인 플라이 애쉬 및 고로슬래그

Fig. 4. L*a*b* Color Space (Konica Minolta)

(a) Target temperature: 500 °C, fck: 50 MPa

(b) Target temperature: 600 °C, fck: 50 MPa

(c) Target temperature: 700 °C, fck: 50 MPa

(d) Target temperature: 800 °C, fck: 50 MPa

Fig. 5. Discoloration of Fire Damaged Concrete Specimen

함유량에 따라 표면색상변화가 전혀 다르게 나타날 수 있다는 문제점이 제기될 수 있다. 더불어, 이 연구에서 사용하였던 분광광도계는 슈미트헤머, 초음파속도 측정기와 같이 일반적으로 안전진단과정에서 사용되는 장비가 아닌 관계로 화재피해 건축물을 진단하는 과정에서 장비의 유무에 따라 수열온도 추정이 불가능 할 수 있다는 문제점이 있다. Fig. 6은 Fig. 3에 나타난 각 실험체 표면의 색상 성분에 따라 발생된 콘크리트 표면 빛 반사율을 나타낸 것으로써, 가시광선 파장범위 중 550 nm 및 740 nm에서 측정된 반사율이다. 콘크리트 압축강도에 따라 화재노출온도가 상승할수록 상대적으로 반사율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 여기에서 550 nm의 파장은 가시광선 스펙트럼 중에서 노란색에 가까운 파장이며, 740 nm의 파장은 가시광선 스펙트럼 중에서 붉은 색에 가까운 파장이다. Fig. 3에서 각 실험체의 a^* , b^* 지수값이 동일하게 뚜렷한 경향성을 나타내고 있지 않지만, 두 성분값 모두 수열온도에 따라 상대적으로 증가함에 따라 Fig. 6과 같은 빛 반사율결과가 나올 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 6은 혼화제가 사용되지 않은 콘크리트가 고온에 노출 될수록 노란색 영역의 파장 및 붉은색 영역의 파장에서 빛 반사율이 높아진다는 것을 나타내고 있는 것으로써, 고온에 노출 될수록 Table 1과는 다르게 붉은색 영역의 파장 변화가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 6은 Table 1에 근거하여 수열온도를 추정하는 것이 적절하지 않음을 재차 확인할 수 있는 분석결과로써, 실무에서 빈번하게 적용되고 있는 육안검사를 통한 수열온도 추정방법의 개선이 반드시 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 Fig. 3에 나타난 각 실험체 표면의 색상 성분에 따라 발생된 콘크리트 표면 빛 반사율을 나타낸 것으로써, 가시광선 파장범위 중 550 nm 및 740 nm에서 측정된 반사율이다. 콘크리트 압축강도에 따라 화재노출온도가 상승할수록 상대적으로 반사율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 여기에서 550 nm의 파장은 가시광선 스펙트럼 중에서 노란색에 가까운 파장이며, 740 nm의 파장은 가시광선 스펙트럼 중에서 붉은 색에 가까운 파장이다. Fig. 3에서 각 실험체의 a^* , b^* 지수값이 동일하게 뚜렷한 경향성을 나타내고 있지 않지만, 두 성분값 모두 수열온도에 따라 상대적으로 증가함에 따라 Fig. 6과 같은 빛 반사율결과가 나올 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 6은 혼화제가 사용되지 않은 콘크리트가 고온에 노출 될수록 노란색 영역의 파장 및 붉은색 영역의 파장에서 빛 반사율이 높아진다는 것을 나타내고 있는 것으로써, 고온에 노출 될수록 Table 1과는 다르게 붉은색 영역의 파장 변화가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 6은 Table 1에 근거하여 수열온도를 추정하는 것이 적절하지 않음을 재차 확인할 수 있는 분석결과로써, 실무에서 빈번하게 적용되고 있는 육안검사를 통한 수열온도 추정방법의 개선이 반드시 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

(a) Wave length: 550 nm

(b) Wave length: 740 nm

Fig. 6. Reflectance of Concrete Surface according to Visible Light Wave Length

4. 결 론

이 연구에서는 화재피해 건축물의 진단과정에서 국내에서 일반적으로 널리 사용되는 육안검사방법 중 하나인 콘크리트 변색상태 판별법에 따른 수열온도 추정방법의 문제점을 제시하였다.

- (1) 육안검사를 통하여 수행되는 콘크리트 변색상태 판별법은 평가자의 주관적인 견해로 판단될 수 있기 때문에 실제 수열온도와는 전혀 다른 수열온도 추정결과를 도출할 수 있다. 그 결과, 실제 구조물의 화재피해 규모와 다른 진단결과를 도출할 수 있으며, 이는 곧 부적절한 보수·보강 방안이 도출될 수 있다.
- (2) 분광광도계를 통하여 화재손상된 콘크리트 표면의 색조분석을 실시한 결과 Table 1에서 제시되고 있는 콘크리트의 변색상태와 수열온도사이의 상관관계가 전혀 다르게 나타났다. 일반적으로 화재손상된 콘크리트는 Table 1과 같이 수열온도범위에 따라 특정 색상으로 변색된다고 알려져 있으며, 이를 실무에서 빈번하게 활용하고 있다. 반면에, 이 연구를 통하여 수행된 정량적인 색조분석결과는 수열온도가 높아질수록 콘크리트 표면 색상성분이 Table 1과는 다르게 나타났으며, 콘크리트 표면의 빛 반사율은 수열온도가 높아질수록 붉은색 영역의 파장에서 반사율이 상대적으로 더 높아지는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 이 연구에서 활용하였던 분광광도계는 다양한 비파괴 진단장비와 같이 일반적인 진단과정에서 널리 사용되는 것이 아닌 관계로, Fig. 4와 같이 수열온도에 따른 콘크리트 표면의 빛 반사율의 경향성에 근거한 수열온도 추정이 어렵다. 비록 장비를 보유하고 있다고 하더라도 색조분석을 수행하는 현장의 환경이 실험실과

같이 동일한 조도를 갖는 측정환경조성이 어려운 관계로 정밀 측정이 어렵다는 문제점이 있다.

- (4) 일반적으로 실제 건축물의 화재사고 현장에서는 부재 표면에 그을음이 부착되어 실질적인 육안검사 및 색조분석이 어렵다. 따라서 사고현장에서는 그을음을 제거하기 위하여 모래 또는 물을 고압 분사하게 되며, 고온으로 인하여 손상을 받은 콘크리트 표면에 모래 또는 물을 고압 분사할 경우에는 부재 표면이 탈락될 수 있기 때문에 이 연구에서 사용하였던 분광광도계를 활용한 색조분석이 어렵다. 분광광도계는 측정하고자 하는 시료의 표면에 장비를 밀착하고, 장비 측정부에서 시료의 표면에 빛을 비추어 색상분석을 실시하게 된다. 이때, 시료의 표면이 고르지 못하게 된다면 측정 시 빛이 외부로 유출되어 정밀한 분석이 어렵게 된다.

이 연구를 통하여 화재손상된 콘크리트를 대상으로 변색상태를 구분하여 수열온도를 추정하는 방법이 실제 수열온도와 전혀 다른 결과를 도출할 수 있다는 것을 정량적인 분석 방법을 통하여 판단할 수 있었다. 화재손상된 구조물의 수열온도 추정은 피해 건축물의 적절한 보수·보강 방안 마련을 통한 신속한 복구를 위하여 비교적 정확하게 이루어져야 한다. 따라서 기존에 널리 사용되고 있는 다양한 수열온도 추정방법의 문제점을 보완할 수 있으며, 활용성을 높일 수 있는 새로운 수열온도 추정방법의 개발이 반드시 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 국민수요 맞춤형 생활안전 연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-MOIS51-003).

References

- American Concrete Institute (ACI). (2008). *Concrete repair manual* (3rd ed.). Farmington Hills, MI, USA: ACI International.
- Architectural Institute of Japan (AIJ). (1983). *Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength*.
- Building Research Establishment (BRE). (1950). Technical paper No. 4.
- Hager, I. (2014). Colour change in heated concrete. *Fire Technology*, Vol. 50, No. 4, pp. 945-958.
- Kang, H., and Kweon, O.S. (2020). Analysis of material performance according to the cooling method of fire damaged concrete. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 3, pp. 167-174.
- Kang, H. (2018). *Assessment for fire damaged reinforced concrete structures based on fuzzy theory*. Ph.D. dissertation, University of Seoul.
- Kang, H., Cho, H.C., Choi, S.H., Heo, I., Kim, H.Y., and Kim, K.S. (2019). Estimation of heating temperature for fire-damaged concrete structures using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Materials*, Vol. 12, No. 23, 3964. doi:10.3390/ma12233964
- Konica Minolta. *L*a*b* color space*. Retrieved from <https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part1/07.html>
- Lee, J. (2014). Study on the method to quantify the color changes of reinforced concrete member subjected to high temperatures. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 30, No. 12, pp. 29-36.
- Lee, J., Choi, K.H., and Hong, K.P. (2006). The changes of color and residual compressive strength of concrete exposed to high temperature with deteriorated depth. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 22, No. 8, pp. 77-84.

Received	October 26, 2020
Revised	October 28, 2020
Accepted	November 10, 2020