

## 충격 공진 기법을 이용한 화재 손상 콘크리트의 재양생 조건별 재료물성 평가

박선종<sup>1</sup>, 임홍재<sup>2\*</sup>

### Evaluation of Material Properties of Fire-damaged Concrete Under Post-fire Curing Regimes Using Impact Resonance Vibration Method

Sun-Jong Park<sup>1</sup>, Hong Jae Yim<sup>2\*</sup>

**Abstract:** When concrete structures expose to fire, the structures were damaged accompanied with degradation of material properties of concrete. In order to determine the reuse of fire-damaged concrete structures, it is needed a careful determination considering conditions of fire damage, such as exposure temperature and exposure time, and also potential to restore fire damage. This study investigates on the evaluation of residual material properties of fire-damaged concrete under different post-fire curing regimes. An experimental study was performed on concrete samples to measure the dynamic elastic modulus by the impact resonance vibration method. Upon the experimental results, the evidence of restoration of material properties was confirmed on specific post-fire curing regimes, higher humidity conditions. Additionally, a correlation analysis was performed on the dynamic elastic modulus with the tensile strength for identifying the effects of post-fire curing regimes on both material properties of fire-damaged concrete.

**Keywords:** Damage recovery, Dynamic elastic modulus, Fire-damaged concrete, Impact resonance vibration method, Post-fire curing regimes, Tensile strength

## 1. 서 론

콘크리트는 높은 내화성과 낮은 열전도율을 가지는 대표적인 건설 재료이다. 따라서 콘크리트 구조물이 화재 등 고온에 노출되었을 경우 콘크리트는 내화재로써 부재 내부의 철근을 보호한다. 그러나 고온에 노출된 콘크리트는 구성물질 간 열팽창률 차이와 같은 물리적 변화와 더불어 결정구조의 변화와 같은 화학적 변화가 발생한다. 이는 미세균열을 유발시킬 뿐만 아니라, 내부 공극수의 증발에 따른 폭렬, 박락 등 거시적인 손상의 직접적인 원인이다. 이로 인해 고온에 노출된 콘크리트 구조물은 수열온도 및 노출시간 등에 따라 급격한 재료물성(강도, 탄성계수 등)의 감소에 따른 안전성 저하가 발생한다(Bazant and Kaplan, 1996; Kim, 2008; Yim et al., 2012).

한편, 화재 손상을 입은 콘크리트는 고온 노출 이후 특정 재양생 조건에서 재료물성이 회복되는데, 여러 조건 중 습도가

높은 경우 재료물성 회복이 두드러지게 나타난다(Poon 2001). 이는 콘크리트 구성물질의 재수화반응에 따른 것으로, 수분의 공급에 따라 C-S-H겔뿐만 아니라 미수화 시멘트, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> 등의 수화 반응이 발생한다. 이와 같은 수화 부산물은 시멘트 매트릭스와 골재 계면의 균열 및 공극을 감소시키고, 구성물질 간 결합력을 강화시켜 화재 손상을 회복시킨다. 화재 손상 콘크리트의 재수화 반응과 이에 따른 미세구조의 변화는 마이크로미터 단위의 전자현미경(scanning electron microscopy), X-선 회절(X-ray diffraction), 3D X-선 단층촬영(3D X-ray computed tomography) 등을 통해 입증된 바 있다(Harada et al., 1972; Sarshar et al., 1993; Lin et al., 1996; Poon, 2001; Alonso and Fernandez, 2004; Henry et al., 2011; Henry et al., 2014). 따라서 화재 손상을 입은 콘크리트 구조물의 재사용 및 보수 보강 여부를 판단하기 위해서는 화재 직후 주요 손상 부위의 평가와 더불어 이후 재양생 조건에 따른 지속적인 평가가 필수적이다.

화재 손상을 입은 콘크리트의 지속적인 평가에 관한 연구는 초음파 속도 측정과 비선형인자 측정에 관한 연구가 한정적으로 수행된 바 있다. 먼저 Lin 등은 화재 손상 이후 수중에서 재양생된 콘크리트의 강도를 측정하여 800°C 노출 시편을 제외한 콘크리트 시편에서 강도의 회복을 확인하였으며, 측

<sup>1</sup>정회원, 한국원자력안전기술원 선임연구원

<sup>2</sup>정회원, 경북대학교 조교수, 교신저자

\*Corresponding author: yimhongjae@gmail.com

Dept. of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University, 2559, Gyeongsang-daero, Sangju-si, Gyeongsangbuk-do, 37224, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11 월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

정된 강도 및 초음파속도 간의 관계식을 도출하였다(Lin et al., 1996). Park 등은 손상평가인자인 비선형인자와 인장강도를 측정하여 화재 손상 이후 높은 습도 조건에서 재양생할 경우 손상 및 강도의 회복이 발생함을 확인하였으며, 비선형인자 측정을 통한 잔존 강도의 추정식을 제안하였다(Park et al., 2015). 한편, 현재까지 탄성계수에 관한 연구는 화재 손상에 따른 탄성계수의 저하에 관해서는 다수의 연구사례가 보고된 바 있다(Phileo, 1958; Bažant and Kaplan, 1996; Phan et al., 2011; Dilek, 2008). 그러나 재양생 조건에 따른 탄성계수의 변화와 관련된 연구는 수행된 사례가 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 화재 손상 콘크리트의 안전성 평가를 위해 재양생 조건에 따른 재료물성 변화에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 충격공진기법을 이용하여 화재 손상 전후 및 재양생 이후 콘크리트의 동탄성계수를 측정하였다. 화재 손상을 입은 콘크리트 시편의 재양생 조건은 습도와 재양생 기간을 달리한 총 12개의 조건을 설정하였다. 측정된 동탄성계수를 토대로 재양생 조건이 콘크리트의 화재 손상에 미치는 영향을 분석하였다. 추가적으로 동탄성계수와 인장강도의 비교를 통해 재양생 조건에 따른 재료물성별 변화 추이를 분석하였다.

## 2. 콘크리트 시편 제작 및 실험

### 2.1 시편 제작

콘크리트 시편은 Table 1에 주어진 배합비로 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 몰드로 제작되었다(W: 물, C: 시멘트, S: 잔골재, G: 굵은 골재). 타설된 직후 콘크리트 시편은 24 시간 동안 기건양생을 거친 후 탈형하여 28 일간 수중양생 하였다. 양생기간이 지난 콘크리트 시편은 시편절단기를 이용하여 두께 25 mm의 원형 판 형태로 제작되었다. 화재 손상 전 원형 판 형태의 시편은 폭발현상을 방지하기 위해 24 시간 동안 80°C로 유지된 오븐 건조기에 보관되었다. 건조된 시편은 총 3가지의 수열온도(300°C, 500°C, 700°C)로 기 설정된 전기로에 노출시킴으로써 화재 손상을 유발하였다. 손상 후 각 시편은 상온의 물에 넣음으로써 냉각시켰으며, 모든 시편에 대해 5 분간 동일하게 냉각을 진행하였다.

냉각 후 콘크리트 시편은 24시간 동안 20°C로 유지된 자연

Table 1 Mix proportion of concrete samples

W/C	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	G
0.5	160	320	922	922

순환건조기에 건조하였으며, Table 2에 정리된 재양생 조건에 따라 각기 분류되었다. 본 연구에서 고려된 재양생 조건은 총 12가지로 서로 다른 4개의 습도 조건 RH10 (상대습도 10%), RH60 (상대습도 60%), RH90 (상대습도 90%), WS (습윤양생)과 서로 다른 3개의 재양생 기간 7일, 15일, 30일을 포함하였으며, 추가적으로 재양생 조건을 거치지 않은 RH0 조건을 고려하였다. 모든 재양생 조건에서 온도는 20°C로 동일하게 유지하였다. 재양생을 마친 콘크리트 시편은 20°C로 유지된 자연순환건조기에서 24시간 동안 건조 후 충격공진실험을 진행하였다.

### 2.2 충격공진실험

콘크리트 시편의 동탄성계수 측정을 위한 충격공진기법의 (impact resonance vibration method) 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 동탄성계수 측정은 원주형 혹은 직사각형 시편에 한정적으로 수행된다(ASTM C 215, 2014). 이에 비해 본 연구에서 적용된 원형 판 형태의 시편은 상대적으로 작은 크기이므로, 해당 시편을 통한 동탄성계수 측정은 실제 콘크리트 구조물에서의 적용성 향상을 기대할 수 있다(Leming

Table 2 Post-fire curing regimes of fire-damaged concrete samples

Sample Label	Humidity(%)	Duration(day)	Temperature(°C)
RH0-0d	-	-	-
RH10-7d	10	7	20
RH10-15d	10	15	
RH10-30d	10	30	
RH60-7d	60	7	
RH60-15d	60	15	
RH60-30d	60	30	
RH90-7d	90	7	
RH90-15d	90	15	
RH90-30d	90	30	
WS-7d	100	7	
WS-15d	100	15	
WS-30d	100	30	

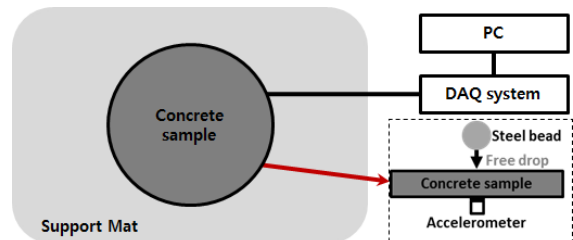
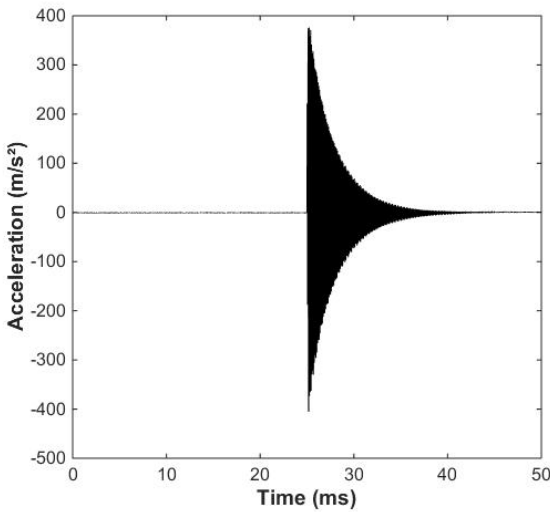
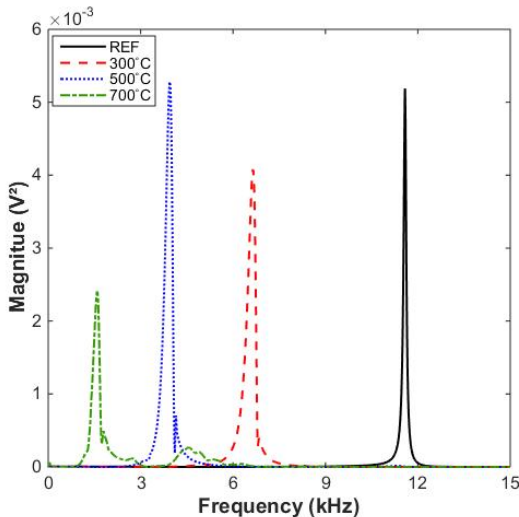


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

et al., 1998). 먼저 시편의 자유진동을 유지하고 외부의 영향을 저감시키기 위한 매트를 콘크리트 시편 밑에 설치하였다. 그리고 시편의 밑면 정중앙에 가속도계를 부착하여 윗면 정중앙부에 가진되는 충격에 따른 공진 신호를 측정하도록 구성하였다. 이때 충격은 무게 13.8 g의 쇠구슬을 자유낙하시켜 가진하였으며, 200 kS/s로 설정된 데이터로거를 이용하여 시편의 공진 신호를 수집 및 저장하였다. 각 실험별로 측정은 50 ms 동안 진행되었으며, 대표적인 시간 축 데이터를 Fig. 2(a)에 나타나내었다. 한편, 계측된 시간 축 데이터는 공진주파수 산정을 위해 FFT를 이용하여 주파수 축 데이터로 변환하였다. Fig. 2(b)는 대표적인 손상 전 및 손상 직후의 주파수 축 데이터를 도식화한 결과이다. 이로부터 수열온도가 증가할수록



(a)



(b)

**Fig. 2** Representative results of impact resonance vibration methods: (a) a time-domain signal measured from a reference sample, (b) a set of frequency-domain signals

공진주파수가 뚜렷하게 감소함을 확인할 수 있다.

한편, 측정된 공진주파수로부터 원형 판 형태의 콘크리트 시편의 동탄성계수를 산정하는 식은 다음과 같다(Leming et al., 1998).

$$E_d = 2(1 + \nu)\rho \left[ \frac{\pi f d}{\Omega_0} \right]^2 \quad (1)$$

여기에서  $E_d$ 는 콘크리트 시편의 동탄성계수,  $\nu$ 는 포아송비,  $\rho$ 는 콘크리트의 밀도,  $f$ 는 충격공진기법을 통해 측정된 고유원 진동수(natural circular frequency),  $d$ 는 시편의 지름,  $\Omega_0$ 는 기본진동모드의 반복적인 해석을 통해 구해지는 무차원 주파수 인자(dimensionless frequency parameter)이다(Leming et al., 1998).

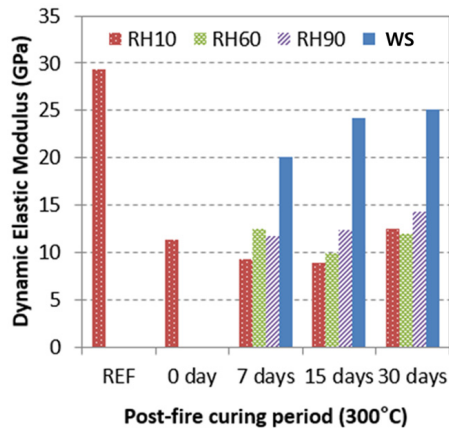
### 3. 실험결과

#### 3.1 동탄성계수 측정

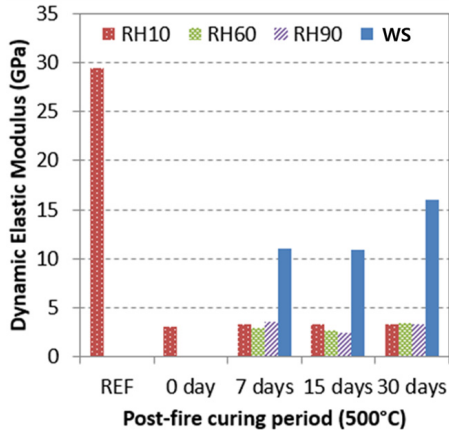
콘크리트 시편의 화재 손상 전과 직후 및 재양생 이후 측정된 결과를 Fig. 3(a)~(c) 및 Table 3에 나타내었으며, 손상 전 시편 대비 감소 후 잔존비율을 추가적으로 Table 3에 정리하였다. 손상 후 콘크리트 시편은 수열온도가 증가함에 따라 동탄성계수가 급격히 감소하는데, 손상을 입지 않은 시편 대비 300°C의 경우 38.8%, 500°C의 경우 8.7%, 700°C의 경우 1.1% 수준의 동탄성계수 값을 보인다. 이로부터 탄성계수가 고온

**Table 3** Average values with standard deviation and decreasing ratio of dynamic elastic modulus ( $E_d$ )

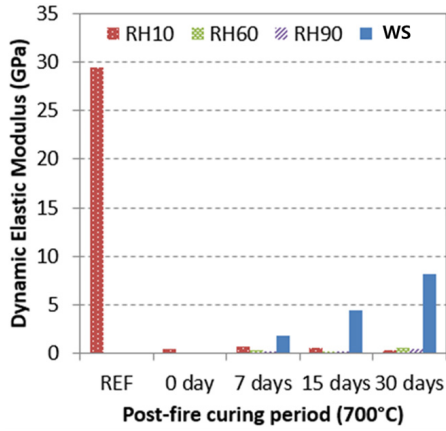
Sample Label	300°C		500°C		700°C	
	Ed(GPa)	Ratio	Ed(GPa)	Ratio	Ed(GPa)	Ratio
RH00-0d	29.39±1.29	100.0%	-	-	-	-
RH10-7d	11.39±1.35	38.8%	2.56±0.47	8.7%	0.31±0.05	1.1%
RH10-15d	8.46±2.19	28.8%	2.65±0.91	9.0%	0.49±0.09	1.7%
RH10-30d	8.76±0.92	29.8%	2.14±0.28	7.3%	0.34±0.09	1.2%
RH60-7d	11.40±0.92	38.8%	2.43±0.44	8.3%	0.42±0.09	1.4%
RH60-15d	10.86±1.77	37.0%	3.56±0.35	12.1%	0.56±0.03	1.9%
RH60-30d	10.19±1.09	34.7%	2.44±0.40	8.3%	0.48±0.07	1.6%
RH90-7d	12.54±0.90	42.7%	3.44±0.46	11.7%	0.40±0.07	1.3%
RH90-15d	12.60±1.57	42.9%	4.38±1.50	14.9%	0.58±0.07	2.0%
RH90-30d	13.92±1.28	47.4%	4.49±0.47	15.3%	0.73±0.16	2.5%
WS-7d	14.93±1.15	50.8%	5.25±1.05	17.9%	1.11±0.18	3.8%
WS-15d	20.04±1.16	68.2%	10.03±1.59	34.1%	1.82±0.71	6.2%
WS-30d	24.26±3.38	82.5%	12.05±1.39	41.0%	4.51±1.29	15.4%



(a)



(b)

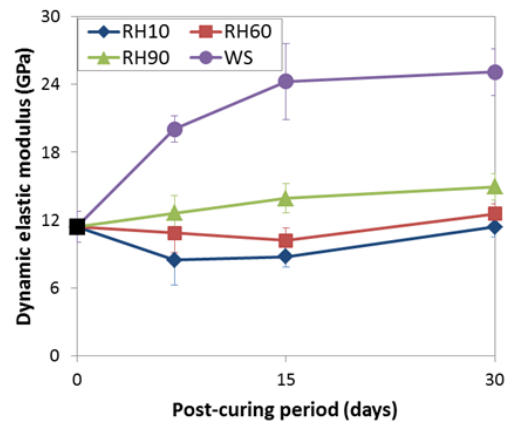


(c)

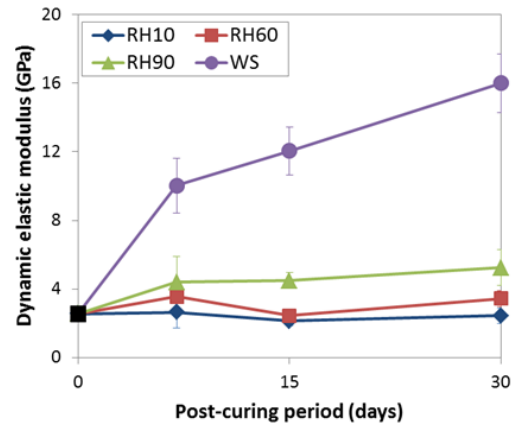
**Fig. 3** Test results of dynamic elastic modulus of fire-damaged concrete samples before and after post-fire curing: (a) exposure to 300°C, (b) exposure to 500°C, and (c) exposure to 700°C

노출 시 발생하는 구성물질의 물리적 및 화학적 변화에 의해 급격하게 저하되는 것으로 사료된다.

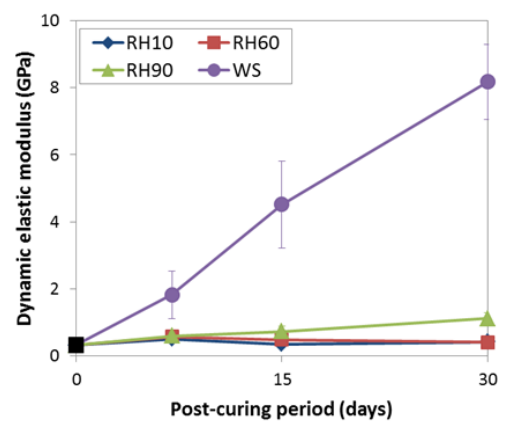
한편, Fig. 3 및 Table 3에 주어진 결과를 토대로 재양생 조건에 따라 측정된 동탄성계수 값은 큰 차이를 보인다. 재양생



(a)



(b)



(c)

**Fig. 4** Recovery rate of dynamic elastic modulus at peak temperatures according to post-fire curing regimes: (a) exposed to 300°C, (b) exposed to 500°C, (c) exposed to 700°C

조건에 따른 영향을 보다 면밀히 분석하기 위해 각 수열온도별 양생기간 및 상대습도 조건별 비교결과를 Fig. 4(a)~(c)에 나타내었다. 먼저 상대적으로 낮은 상대습도 조건인 RH10(상대습도 10%) 및 RH60(상대습도 60%)에서는 수열온도 및 재

양생 기간에 상관없이 동탄성계수의 변화가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이로부터 일정 수준 이하의 상대습도 조건에서는 콘크리트의 화재 손상회복이 거의 발생하지 않는 것으로 보인다. 한편, 상대적으로 높은 상대습도 조건인 RH90 (상대습도 90%) 및 WS(습윤양생)에서는 재양생 기간이 지남에 따라 점차 동탄성계수의 회복이 발생함을 확인할 수 있으며, 수열온도와 관계없이 동탄성계수가 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다. 특히, 습윤양생 조건에서는 다른 재양생 조건에 비해 현저하게 높은 회복 정도를 보여준다. 이를 통해 습도 조건이 화재 손상 콘크리트의 동탄성계수 회복에 지배적인 영향을 가짐을 확인할 수 있었다. 동탄성계수는 WS에서 30일이 경과하면 손상 직후 시편에 비해 300°C에서는 2.2배, 500°C에서는 5.0배, 700°C에서는 23.4배 증가한다. 한편, 손상을 입지 않은 시편에 비해서는 동탄성계수가 300°C에서는 85%, 500°C에서는 54%, 700°C에서는 27% 수준까지 회복되는 것으로 나타난다. 이를 종합해보면 700°C에 노출된 콘크리트 시편에서 재양생 후 회복되는 비율이 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 회복 이후의 잔존 동탄성계수의 수준은

손상 전에 비해 30% 미만이므로, 해당 콘크리트는 보수가 반드시 필요한 상태라고 판단된다. 한편, 500°C 이하에 노출된 콘크리트에서는 손상 이후 충분한 수분 공급을 통한 동탄성계수 및 재료물성의 회복을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 동탄성계수와 인장강도의 관계

콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 화재 손상의 영향을 보다 크게 받는 것으로 보고된 바 있다(Bazant and Kaplan 1996). 본 연구진은 동일 콘크리트 시편에 대해 화재 손상 전후 및 재양생 조건을 거친 후 활렬 인장강도 측정을 수행하였다(Park et al. 2015). 재양생 조건이 콘크리트의 재료물성 회복에 미치는 영향을 면밀히 분석하기 위해 충격공진기법을 통해 측정된 동탄성계수 측정 결과와의 기 측정된 인장강도 결과와의 직접적인 비교분석을 수행하였다. 이를 토대로 두 측정결과의 상관관계를 도출하고, 콘크리트의 화재 손상 전후 및 재양생 조건에 따른 재료물성별 변화 추이를 분석하였다.

Fig. 5는 인장강도 측정결과와 동탄성계수 측정결과 간 직접적인 관계를 재양생 조건별로 분석한 결과이다. 상대적으로

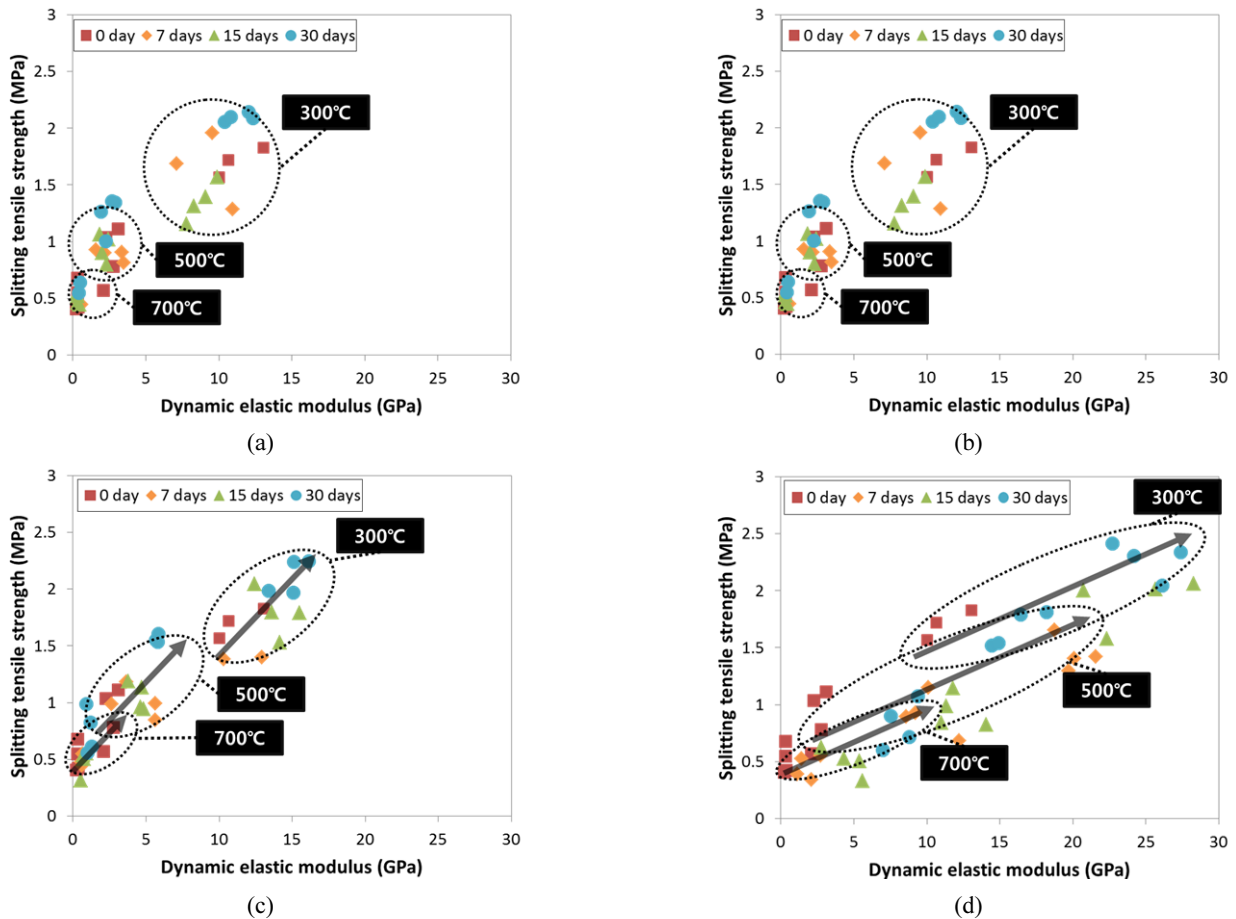


Fig. 5 Correlated results of dynamic elastic modulus and splitting tensile strength depending on different post-fire curing regimes: (a) RH10, (b) RH60, (c) RH90, (d) WS

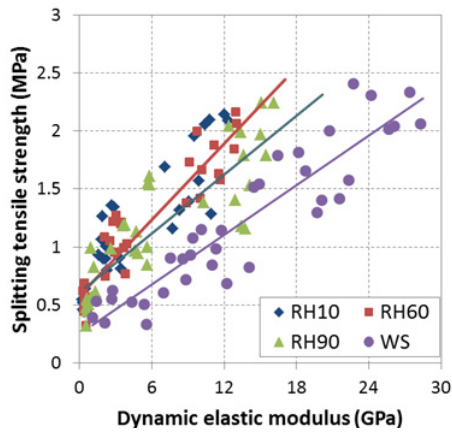


Fig. 6 Total results of correlation between dynamic elastic modulus and splitting tensile strength

로 낮은 습도의 재양생 조건인 RH10 및 RH60에서는 재양생 기간이 동탄성계수와 인장강도에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 해당 조건에서 화재 손상 콘크리트의 동탄성계수 및 인장강도 회복이 거의 발생하지 않는 것으로 보인다. 한편, 상대적으로 높은 습도의 재양생 조건인 RH90 및 WS에서는 재양생 기간이 지남에 따라 동탄성계수 및 인장강도가 점차 회복됨을 확인할 수 있다. 특히, 습윤양생 조건인 WS에서는 인장강도 및 동탄성계수가 큰 폭으로 회복되는 경향을 보이며, 인장강도에 비해 동탄성계수의 회복이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다.

한편, 상대습도 조건에 따른 동탄성계수와 인장강도의 선형회귀분석 결과를 통합하여 Fig. 6에 나타내었다. 해당 결과로부터 상대습도가 높은 경우 그래프 상 기울기가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 충분한 수분 공급 시 발생하는 동탄성계수의 회복이 인장강도에 비해 상대적으로 두드러지게 나타나기 때문이다. 즉, 콘크리트의 초기탄성계수로부터 결정되는 동탄성계수가 수분 공급에 따른 미세균열 및 공극의 회복에 더 지배적인 영향을 받는다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 화재 손상 콘크리트의 손상 회복 판단을 위해서는 재양생 조건, 특히 상대습도를 고려한 판단이 이루어져야함을 알 수 있다. 또한, 인장강도 측정 결과보다 손상 회복에 더 지배적인 영향을 받는 동탄성계수의 측정에 기반한 콘크리트 성능 평가가 수행되어야 할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 화재 손상을 입은 콘크리트 구조물의 안전성 평가를 위해 재양생 조건에 따른 콘크리트의 재료물성의 변화 및 회복 여부를 규명하고자 실험적 연구를 수행하였다.

화재 손상을 입은 콘크리트의 동탄성계수 측정을 위해 충격공진기법을 도입하였으며, 수열온도가 증가함에 따라 발생하는 공극 및 미세균열로 인해 동탄성계수의 감소가 발생함을 확인하였다. 한편, 충분한 수분 공급 시 발생하는 콘크리트 구성물질의 재수화 반응은 저감된 동탄성계수 및 인장강도의 회복을 유발하며, 주어진 재양생 조건 중 RH90(상대습도 90%) 및 WS(습윤양생)에서 재양생 기간이 길수록 두드러지게 나타났다. 반면, 낮은 상대습도 조건에서는 동탄성계수의 회복이 거의 발생하지 않았다. 따라서 콘크리트 구조물의 화재 손상 이후 충분한 기간 동안 높은 상대습도 조건을 유지할 경우 저감된 재료물성의 회복을 기대할 수 있음을 확인하였다. 추가적으로 화재 손상 콘크리트의 동탄성계수와 인장강도의 직접적인 관계 분석을 토대로 높은 상대 습도 조건에서 인장강도에 비해 동탄성계수의 회복이 두드러지게 나타남을 확인하였다. 따라서 화재 손상 콘크리트 구조물의 보수 및 보강 판단을 위한 안전성 평가를 진행할 경우 습도조건에 기반한 동탄성계수의 측정을 적용하여 보다 면밀한 진단이 이루어져야 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

#### References

Alonso, C. and Fernandez, L. (2004), Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of materials science*, 39(9), 3015-24.

ASTM International (2014), Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens, ASTM C 215-14, American Society for Testing and Materials, 7p.

Bazant, Z. P. and Kaplan, M. F. (1996), *Concrete at High Temperature: Material Properties and Mathematical Models*, Longman Group Limited, 6-85.

Dilek, U. (2008), Assessment of damage gradients using dynamic modulus of thin concrete disks, *ACI Materials Journal*, 105(5), 429-437.

Harada, T., Takeda, J., and S. Yamane F. F. (1972), Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, *ACI Special Publication*, 34, 377-406.

Henry, M., Darma, I. S., and Sugiyama, T. (2014), Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT, *Construction and Building Materials*, 67, 37-46.

- Henry, M., Suzuki, M., and Kato, Y. (2011), Behavior of fire-damaged mortar under variable re-curing conditions, *ACI Materials Journal*, 108(3), 281-289.
- Kim, W. J. (2008), Fire of Reinforce Concrete Structure, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 20(5), 12-21.
- Leming, M. L., Nau, J. M., and Fukuda, J. (1998), Non-destructive determination of the dynamic modulus of concrete disks, *ACI Materials Journal*, 95(1), 50-57.
- Lin, W. M., Lin T., and Powers-Couche L. (1996), Microstructures of fire-damaged concrete, *ACI materials journal*, 93(3), 199-205.
- Lin, Y., Hsiao, C., Yang, H., and Lin, Y.-F. (2011), The effect of post-fire-curing on strength-velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength, *Fire Safety Journal*, 46(4), 178-85.
- Park, S.-J., Yim, H. J., and Kwak, H.-G. (2015), Effects of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete, *Construction and Building Materials*, 99, 90-98.
- Phan, L. T., Lawson, J. R., and Davis, F. L. (2001), Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and Structures*, 34(2), 83-91.
- Philleo, R. (1958), Some physical properties of concrete at high temperatures, *ACI Journal Proceedings*, 54(4), 857-864.
- Poon, C.-S., Azhar, S., Anson, M., and Wong, Y.-L. (2001), Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1307-18.
- Sarshar, R. and Khoury, G. (1993), Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures, *Magazine of concrete research*, 45(162), 51-61.
- Yim, H. J., Kim, J. H., Park, S.-J., and Kwak, H.-G. (2012), Characterization of thermally damaged concrete using a nonlinear ultrasonic method, *Cement and Concrete Research*, 42(11), 1438-46.

Received : 03/06/2017

Revised : 03/16/2017

Accepted : 03/29/2017

---

**요 지** : 콘크리트 구조물이 화재 손상을 입을 경우 노출온도 및 지속시간에 따라 구조물의 심각한 성능 저하를 야기하며, 콘크리트의 재료 물성 저하를 수반한다. 화재 손상을 입은 콘크리트 구조물의 재사용여부 및 보수보강 판단을 위해서는 손상 직후 및 재양생 조건에 따른 주요 손상 부위의 면밀한 손상 평가가 필요하다. 본 연구에서는 재양생 조건에 따른 화재 손상을 입은 콘크리트의 재료물성 회복에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 화재 손상을 입은 콘크리트 시편을 상대습도 및 재양생 기간을 달리한 재양생 조건을 적용하였으며, 충격공진기법을 도입하여 콘크리트 시편의 화재 손상 전후 및 재양생 이후의 동탄성계수를 측정하여 손상 정도를 평가하였다. 측정된 결과로부터 재양생 조건 중 높은 상대습도 조건에서 지배적으로 재료물성의 회복이 발생하였다. 추가적으로 콘크리트 시편의 동탄성계수 및 인장강도의 직접적인 비교 및 선형 회귀분석을 수행하여 재양생 조건에 따른 영향을 분석하였으며, 이를 토대로 높은 습도 조건에서 동탄성계수의 회복이 인장강도에 비해 두드러지게 나타남을 확인하였다.

**핵심용어** : 손상 회복, 동탄성계수, 화재 손상 콘크리트, 충격공진기법, 재양생 조건, 인장강도

---