

화재 피해를 입은 철근콘크리트 슬래브의 잔존 구조성능 평가기법

최광호
남서울대학교 건축공학과

Evaluation Techniques for Residual Structural Performance of a Reinforced Concrete slab under Fire Damage

Kwang-Ho Choi
Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 이 연구에서는 철근콘크리트 건축물의 슬래브에 대해 화재 후 잔존 구조성능을 상온 시 내구성 진단과는 다르게, 고온특성을 보다 정확히 평가하기 위하여 전기로를 이용 800 °C까지의 가열실험을 수행하였고 가열 전 후의 잔존 구조성능을 반발경도법과 초음파속도법 등의 비파괴 검사와 아울러 진동실험으로 구한 고유진동수로 처짐계산에 사용되는 강성을 평가하는 기법을 제안하였다. 반발경도를 이용한 압축강도 평가에서는 두꺼운 두께와 물/시멘트비(W/C)가 큰 실험체의 잔존 압축강도가 크게 나타났다. 콘크리트를 투과하는 초음파속도로 상온 대비 고온수열 콘크리트의 균질도를 평가하였으며 W/C와 부재 두께의 차이는 초음파 속도법의 결과에 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다. 화재 피해 슬래브의 처짐 증가에 영향을 미치는 강성을 평가하기 위한 기법으로, 진동실험에 의해 고유진동수를 측정하고 이를 강성과의 관계식에 대입하였으며, 이를 슬래브 실험체에 적용해 본 결과 매우 합리적인 평가기법이 될 수 있음을 보여주었다. 또한, 고온 수열 후 부재의 잔존강도를 평가하기 위해 가열중과 가열 후 가력실험을 수행한 결과 800 °C 내력은 상온의 부재 내력에 비해 22%의 감소를 나타내었다.

Abstract This study proposes non-destructive rebound-hardness and ultrasonic testing methods to more accurately evaluate the residual structural performance of reinforced concrete structures in a fire. Techniques are also proposed to assess the stiffness used in the deflection calculation with natural frequencies obtained by vibration tests. In the compressive strength evaluation using rebound hardness, the residual compressive strength of thick specimens and a larger water/cement (W/C) ratio were shown to be large. The homogeneity of concrete at high temperature compared to ambient temperature conditions was assessed by the velocity of ultrasonic waves that penetrate the concrete, and it followed W/C or thickness of slab makes little different results<note: This part is ambiguous; clarification by the author is needed>. To assess the stiffness of fire-damaged slabs and increase in deflection, the natural frequency was measured by vibration tests and incorporated into the equation of the stiffness. The application of this technique to the slab experiment showed that it can be a very reasonable evaluation technique. In addition, to evaluate the residual strength of a member after fire, a test of the strength of a component was carried out during and after heating.

Keywords : Non-destructive testing, Rebound hardness method, Ultrasonic speed method, Residual structural performance, Reinforced concrete slab

본 논문은 2018년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Kwang-Ho Choi(Namseoul Univ.)

email: choikh@nsu.ac.kr

Received December 10, 2019

Revised January 14, 2020

Accepted February 7, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

화재 피해를 입은 철근콘크리트 부재의 잔존 성능평가에 대한 연구는 현재 국내에서는 화재안전규정, 내화구조기준 및 콘크리트 재료특성에 관한 연구[1, 2] 등으로 수행되고 있으나, 화재안전규정과 내화구조기준 연구는 화재시 안전과 내화 설계 시 고려하여야 되는 사양 기준에 초점을 맞추고 있어 화재피해로 인한 잔존성능의 정량적 평가로 사용하기에는 미흡한 면이 있다.

화재 피해를 입은 철근콘크리트 건축물의 구조특성은 수열 온도 및 시간에 따른 재료특성의 변화에 의해 달라지는 데, 각각의 영향 인자들을 실시간으로 측정하기가 매우 어려워, 화재 피해 건축물의 안전진단 시 이러한 고온 특성이 고려되지 않고 내구성 진단에 보정치를 적용하는 방법을 택하고 있어 실제 잔존성능보다 낮게 평가될 수밖에 없다.

이 연구에서는 화재를 경험한 철근콘크리트 건축물의 슬래브 부재에 대한 잔존 강도 및 처짐과 관련된 강성의 변화를 정확히 평가하기 위하여 전기로를 이용 슬래브의 가열실험을 수행하였다. 가열 전 후의 강도 비교는 반발경도법과 초음파속도법 등의 비파괴 검사법을 통해 진행하고, 처짐 계산에 사용되는 강성은 진동실험으로 슬래브의 고유진동수를 측정하고 이를 강성과의 상관식에 대입하여 산정하는 기법을 제안하고자 한다.

2. 잔존 구조성능 평가기법

화재피해 건축물의 잔존 구조성능 평가 시 많이 사용되는 비파괴검사법은 상온에서의 강도추정 및 균질도 평가에 사용되는 반발경도법과 초음파속도법이다. 먼저, 반발경도법은 콘크리트의 반발경도를 슈미트 해머(schmidt hammer)를 사용하여 측정하고, 반발경도와 콘크리트의 압축강도의 상관관계식을 이용하여 압축강도를 추정하는 방법이다. 일반적으로 타격시의 반발도(R)는 타격 에너지 및 부재의 형상, 크기, 재료 특성에 따라 다르기 때문에, 반발경도에 의한 강도를 정확히 측정하기는 곤란하지만 실험방법이 국제적으로 표준화되어 있고, 사용법이 간편하며 구조물 전체에 대해 강도측정이 가능하다. 초음파속도법으로는 콘크리트 균질도 및 강도 추정, 내부 공극 및 균열의 유무와 깊이 추정이 가능하다. 초음파법에서는 발진자로부터 발생된 초음파가 일정 거리만큼 떨어진 수신자에 전달되는 시간을 측정함으로써,

초음파가 측정부위를 통과하는 속도를 계산할 수 있다[3, 4].

이들 비파괴 검사와 아울러 이 연구에서는 실험체 가열 전, 후에 진동실험을 실시하여 가속도를 측정한다. 측정된 시간이력의 가속도는 푸리에 변환을 통하여 진동수 영역으로 나타낼 수 있으며, 이 중 가장 큰 진동수인 고유진동수와 강성과의 관계식 Eq. (1)이나, 이 식을 변환한 Eq. (2)식을 통하여 강성을 평가하였다[5].

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

$$\frac{Eh^3}{12} = \frac{(2\pi)^2 a^4 f_{ij}^2 \gamma}{\lambda_{ij}^4} (1-\nu^2) \quad (2)$$

Where, f denotes natural frequency(Hz), a denotes long side length of slab(m), b denotes short side length(m), E denotes elastic modulus(N/m²), ν denotes poisson's ratio(0.167 for concrete), λ denotes coefficient for boundary condition and aspect ratio and Eq. (3) is in case of simply supported conditions at 4 sides of slab

$$\lambda_{ij}^2 = \pi^2 (i^2 + j^2 (\frac{a}{b})^2) \quad (3)$$

Where, i denotes numbers of half waves of horizontal axis at corresponding mode shape, j denotes the same index of i at vertical axis in which case ohape, $i=1, j=1$

3. 철근콘크리트 슬래브의 가열 실험

3.1 실험체 상세 및 배합

실험체 상세를 살펴보면 Fig. 1과 같이 크기는 1200 mm × 1900 mm이고 두께는 60 mm와 100 mm 두 종류이며 피복은 20 mm였다. 철근 배근은 두께 60 mm 실험체에서 직경 4 mm, 두께 100 mm 실험체에서 직경 6 mm 와이어메쉬를 사용하여 100 mm × 100 mm 간격으로 되었는데, 실험체의 두께를 60 mm로 작게 한 이유는 두께변수와 아울러 온도영향 변수인 W/C의 변화를 파악하기 위함이었다. 가열 중 실험체 수열 온도를 측정하기 위하여 K-type 열전대를 슬래브 하부 면에서 24 mm, 68 mm 위치에 매설하였다. 실험체 제작 시 콘크

리트 배합은 고온 수열 철근콘크리트의 잔존강도에 큰 영향을 미치는 물/시멘트비(W/C)를 변수로 Table 1과 같이 설계 제조되었다.

3.2 실험방법

3.2.1 실험체 설치

실험체는 전기로 주변에 단순지지 조건인 상태로 놓여졌으며, 슬래브와 전기로 사이의 열 누출을 막기 위해 지지단을 따라 암면 패드를 깔았다. 실험체를 설치한 전경은 Fig. 2와 같다.

3.2.2 실험 방법

이 연구에서는 3.1의 실험체 상세 및 배합조건의 차이에 따른 고온 수열 후 잔존 강도와 강성 등의 구조성능 비교를 위하여, Table 2와 같이 9개의 실험체에 대해 상온과 600 ℃ 및 800 ℃의 온도조건을 조합하여 가열 및 가력실험을 실시하였다

Table 1. Concrete mixture proportions

W/C (%)	S/a (%)	binder (kg/m ³)	water (kg/m ³)	components(kg/m ³)					
				G	S	C	BFS	FA	Ad
45.0	48.5	338	152	939	878	304	0	34	0.9
55.0	48.5	338	186	893	835	304	0	34	0.2

Table 2. Test status of variables

variables of specimen			temperature		
W/C (%)	diameter of rebar	thickness (mm)	room temp.	600 ℃	800 ℃
45	∅ 4	60	test	test	
	∅ 6	100	test		test
55	∅ 4	60	test	test	test
	∅ 6	100	test		test

가열은 13.3 ℃/분의 속도로 목표 온도 600 ℃, 800 ℃에 도달될 때까지 온도를 선형 증가시키고, 목표 온도 도달 후 그 온도가 유지되는 동안의 변화를 관찰하기 위하여 2시간을 지속시킨 후 자연 냉각되게 하였다[6]. 실험 순서는 가열 전과 후에 슬래브 윗면에서 슈미트 해머로 반발경도와 펀디트를 이용하여 초음파 속도를 측정하였다. 아울러, 5개의 가속도계를 실험체 중앙에서 십자 형태로 부착하여 고무 해머를 이용, 자유진동 실험을 실

시하였다. 실험체의 비파괴실험 위치와 가속도계 부착 위치는 Fig. 3과 같다.

3.3 실험결과

이 연구에서는 철근콘크리트 슬래브가 화재 시 일면만 가열되는 화재 조건을 모사하기 위하여 전기로 뚜껑위치에 실험체를 설치하고, 600 ℃와 800 ℃의 고온을 가열하였으며, 가열 전과 후 단계의 성능변화를 파악하기 위하여 슈미트 해머에 의한 반발경도와 펀디트에 의한 초음파 속도를 측정하였다. 아울러, 자유진동 실험으로부터 가속도의 변화를 측정하였으며 실험체 제작단계에서 매 된 열전대로 가열 시 실험체 내부 온도분포를 알 수 있었다. 가열 중과 가열 후에 하중을 가력하여 내력의 변화를 살펴보았다.

3.3.1 균열 및 파괴양상

모든 실험체의 가력 후 균열양상은 Fig. 4와 같이 슬래브 상부에 설치한 가력판 주위를 따라 발생한 2방향 전단균열이었고, 이 균열들이 슬래브 단부로 진전되면서 함-전단균열 양상을 나타내었다.

3.3.2 비파괴 실험결과

600 ℃와 800 ℃의 고온을 받은 철근콘크리트 슬래브 실험체는 강도, 강성 등의 구조성능 저하와 처짐 균열이 증가하였으며, 상온 대비 변화된 값들을 비파괴검사로 비교 평가하였다

1) 반발경도 측정결과

이 연구에서는 슈미트해머의 반발 경도값으로부터 압축강도를 추정하는 여러 식들 중 콘크리트품질 관리 표준[7]의 Eq. (4)를 사용하여 압축강도를 비교하였으며 Table 3에 나타내었다.

$$f_{ck} = -18 + 1.27R_0 \quad (4)$$

Where, f_{ck} denotes compressive strength (unit : MPa), R_0 denotes modified rebound hardness in which the measured rebound hardness R is added to the correction factor ΔR depending on the hit angle of the Schmidt hammer.

Table 3에서 상온 시의 실험체 평균 강도는 24.65 MPa로 계산되었고, 강도 추정시 가장 많이 사용되는 반발경도법이 슬래브 두께와 W/C의 차이에 따라 압축강도 계산에 미치는 영향이 나타나 있다. 먼저, 슬래브 두께의

영향을 살펴보면 100 mm 두께 슬래브는 60 mm 두께 슬래브보다 반발경도법으로 계산한 압축강도가 크게 나타났다. 예로 W/C 55 800 ℃ 가열 시 60 mm 두께 슬래브의 압축강도는 0 이었지만 100 mm 두께 슬래브는 24.04 MPa로 상온 대비 97.5 %의 잔존강도를 갖는 것으로 계산되었는데, 이는 슬래브가 고온을 받았지만 두께가 두꺼워 상대적으로 손상되지 않는 부위가 많이 남아 있기 때문으로 여겨졌다.

Table 3. Results of rebound hardness test

W/C	slab thickness (diameter of rebar)	temperature		
		20℃	600℃	800℃
45	60 mm ($\phi 4$)	R	30.5	20
		f_{ck} (MPa)	24.65	11.72
		strength ratio(%)	100	47.5
	100mm ($\phi 6$)	R	30.5	26
		f_{ck} (MPa)	24.65	19.11
		strength ratio(%)	100	77.5
55	60 mm ($\phi 4$)	R	30.5	10
		f_{ck} (MPa)	24.65	15.41
		strength ratio(%)	100	62.5
	100mm ($\phi 6$)	R	30.5	30
		f_{ck} (MPa)	24.65	24.04
		strength ratio(%)	100	97.5

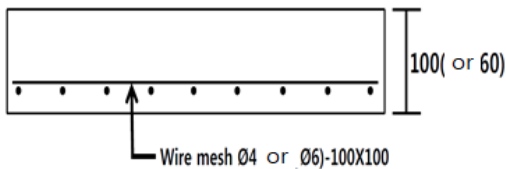


Fig. 1. Specimen details



Fig. 2. Set up of specimen on electric furnace with glass wool

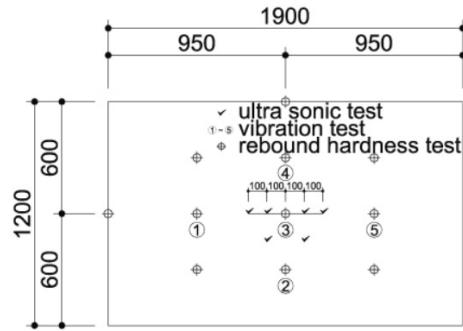


Fig. 3. Accelerometer and non-destructive Inspection locations of upper side of specimen

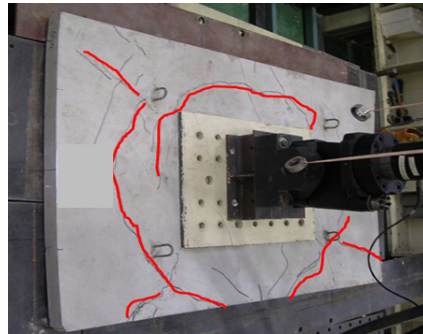


Fig. 4. Crack pattern of specimen at upper side after loading

W/C차이에 따른 잔존강도비를 살펴보면, 두께 60 mm 슬래브가 600 ℃를 받는 경우 W/C 55는 62.5 %, W/C 45는 47.5 %의 잔존강도가 있고 두께 100 mm 슬래브가 800 ℃를 받는 경우도 W/C 55는 97.5 %, W/C 45는 77.5 %의 잔존강도가 있어, 콘크리트 배합설계 시 W/C가 클수록 잔존강도가 큰 것으로 나타났다.

2) 초음파 속도 측정결과

펀드트에 의한 초음파 속도를 측정하여 실험체의 화재 손상 전 후 콘크리트 치밀도 또는 균질도를 비교[8]하였으며, Table 4와 같다. W/C의 차이에 따른 초음파 속도가 비슷하여 W/C 45와 55를 구분하지 않았으며 두께별로 평균값을 사용하였다. 두께 60 mm와 100 mm 슬래브의 상온대비 초음파 감소율은 600 ℃에서 0.6, 800 ℃에서 0.7 내지 0.8 정도로 나타났다.

3) 진동 실험결과

진동계측을 활용한 화재 피해 슬래브의 강성을 평가하기 위하여, 자유진동실험으로 측정된 가속도를 퓨리에 변

환(Fourier transform)하여 고유진동수를 구하고, 이를 판 부재의 고유진동수와 강성의 관계식인 Eq. 2에 대입하여 강성을 계산하였으며 Table 5와 같다. 초음파 속도 분석과 같이 W/C의 차이에 따른 가속도 값의 차이가 거의 없어 W/C 45와 55를 구분하지 않았으며 두께별로는 평균값을 사용하였다. 두께가 60 mm 슬래브인 경우 상온의 강성(E-I) 값 $53 \times 10^5 \text{ Nm}^2$ 와 비교, 600 ℃의 감소율은 0.6, 800 ℃의 감소율은 0.9로 나타났다. 100 mm 두께 슬래브도 60 mm 실험체와 비슷하게 800 ℃ 수열 조건이 상온대비 0.9의 감소율을 보였다. 이와 같이 화재 피해 건축물의 잔존 구조성능평가, 특히 처짐 계산에 필요한 강성의 변화를 진동시험을 통해 평가하는 것은 매우 합리적인 평가기법이 될 수 있음을 보여주었다.

Table 4. Ultra sonic speed(m/sec) of pundit test with temperatures change

W/C	thickness (diameter)	20 ℃	600 ℃	800 ℃
45, 55	60 mm (φ4)	680	280	110
	reduction ratio	1	0.6	0.8
	100 mm (φ6)	1700		590
	reduction ratio	1		0.7

3.3.3 하중 - 변위 곡선

철근콘크리트 건축물은 화재 시 고온으로 인한 재료특성 변화로 내력이 감소되며, 안전진단 시 잔존내력이 정확히 평가되어야 합리적인 보수보강을 계획할 수 있다. 이 연구에서는 화재 후 잔존내력의 정확한 평가를 위하여, 실험체를 가력한 상태에서 가열하는 가열가력과 가열 후 가력하는 잔존가력 방법을 사용하였다. W/C 45, 55로 배합한 두께 100 mm 슬래브 실험체에 대해 상온 상태와 800 ℃가열 상태의 하중 - 변위 곡선을 비교하였으며 Fig. 5에서 Fig 7에 나타나 있다. Fig. 5는 W/C 45, 두께 100 mm 슬래브의 최대 내력 비교로서 상온 실험체의 내력 180 kN에 비해 800 ℃로 가열후 가력한 잔존가력 실험체는 140 kN, 가력상태에서 가열한 가열가력 실험체는 136 kN으로 약 22 %의 강도 감소를 보여 주었다.

Fig. 6은 W/C 55, 두께 100 mm 슬래브의 가열가력과 잔존가력 조건의 두 실험체 최대 내력 비교로서 W/C 45와 비교하여 두 가지 상태의 내력차이는 크지 않았다.

Table 5. Results of vibration test

W/C	thickness (diameter)	20 ℃	600 ℃	800 ℃	
45, 55	60mm(φ4)	f (Hz)	73	47	23
		EI ($\times 10^5$)	53	22	5.3
		reduction ratio	1	0.6	0.9
	100mm(φ6)	f (Hz)	105		25
		EI ($\times 10^5$)	110		6.3
		reduction ratio	1		0.9

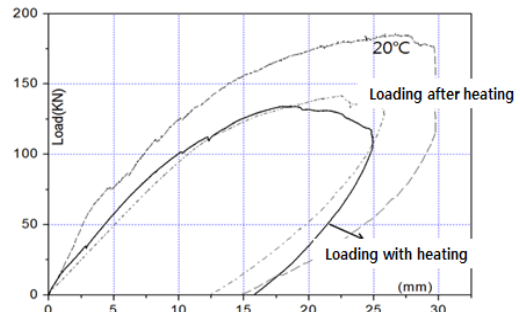


Fig. 5. Load - displacement curve of 100 mm thickness specimen with W/C 45 under 800℃

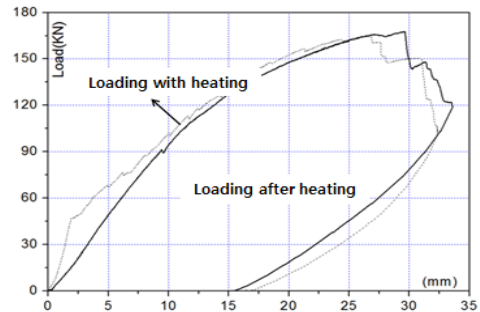


Fig. 6. Load - displacement curve of 100 mm thickness specimen with W/C 55 under 800℃

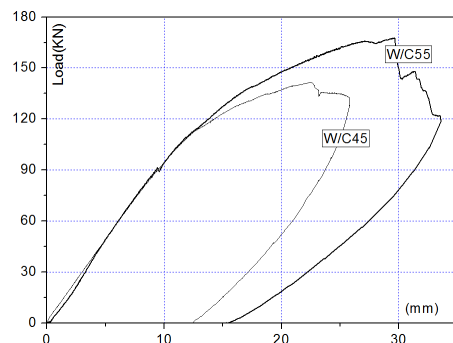


Fig. 7. Load - displacement curve of 100 mm thickness slab under 800 ℃ by W/C condition

또한, 800 ℃ 가열실험에서 W/C 차이에 따른 내력을 비교하였으며 Fig. 7에 나타나 있다. W/C 55 실험체의 최대 내력이 162 kN으로 W/C 45 조건에 비해 15 %정도 크게 나타났으며 강성은 차이가 없었다.

800 ℃는 140 kN으로 22 %의 감소가 있었으며, 800 ℃에서 W/C 55의 잔존 내력이 162 kN으로 W/C 45 조건의 140 kN보다 15 % 정도 크게 나타났으며 강성의 차이는 없었다.

4. 결론

이 연구에서는 철근콘크리트 건축물의 슬래브에 대해 화재 후 잔존 구조성능을 상온 시 내구성 진단과는 다르게, 고온특성을 보다 정확히 평가하기 위하여 전기로를 이용 800 ℃까지의 가열실험을 수행하였고 가열 전 후의 잔존 구조성능을 반발경도법과 초음파속도법 등의 비파괴 검사와 아울러 진동실험으로 구한 고유진동수로 처짐 계산에 사용되는 강성을 산정하는 기법을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화재 피해 건축물의 잔존 압축강도를 슈미트해머에 의한 반발경도법으로 평가할 때 슬래브 두께와 W/C변화에 따른 차이를 살펴보았다. 상대적으로 60 mm보다 두꺼운 100 mm두께의 슬래브 반발경도 값이 컸는데, 이로부터 반발경도법의 사용 시 부재 두께의 차이를 고려하여야 하는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 배합설계 시 W/C가 클수록 고온 수열 후 잔존 압축강도가 큰 것으로 나타났다.
- 2) 펀드이트에 의한 초음파 속도를 측정하여 실험체의 화재 손상 전 후 콘크리트 치밀도 또는 균질도를 비교하였다. 상온대비 고온 시 초음파 감소율은 600 ℃에서 0.6, 800 ℃에서 0.7 내지 0.8 정도로 나타났으며, 이로부터 W/C와 부재 두께의 차이는 초음파 속도법의 결과에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.
- 3) 고온 수열 철근콘크리트 슬래브의 처짐 계산에 필요한 강성의 변화를 진동시험을 통해 평가하였다. 두께가 60 mm, 100 mm 슬래브의 상온시 강성은 다르지만, 고온의 감소율은 600 ℃ 0.6, 800 ℃ 0.9로 같게 나타났다. 기존 철근콘크리트 기준에서는 상온의 강성 산정만 명시되어 있는 상태로, 이 연구에서 제안하는 진동실험에 의한 강성평가 기법은 화재 피해 건축물의 안전진단 시 합리적인 평가의 근거가 될 수 있다.
- 4) 두께 100 mm 슬래브 실험체에 대해 고온에 따른 잔존내력을 비교하였다. 상온 내력 180 kN에 비해

References

- [1] S. J. Foster, "Experimental Behaviour of Concrete Floor Slabs at Large Displacements", *Engineering Structures*, Vol.26, No.9, pp.1231-1247, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.04.002>
- [2] S. J. Foster, "High-Temperature Experiments on Model-scale Concrete Slabs at High Displacement", *Proceedings of Third International Workshop -Structures in Fire*, Ottawa, Canada, pp.121-128, May 2004.
- [3] K. H. Choi, J. W. Lee, S. H. Kim, *Techniques of Safety Diagnosis of Structures*, Kimundang Publishers, 2015, pp.232
- [4] K. H. Choi, J. H. Yoon, "A Comparative Study of Reliability of Compressive Strength Equation of Ultrasonic Pulse Velocity Method and Resonance Test", *Journal of the NSU Smart Green Architectural Engineering Research Institute*, Vol.2, No.1, pp.1-7, November 2017.
- [5] L.F. Boswell, C. D. Mello, *Dynamics of structural system*, The Department of Civil Engineering, City University of London Publishers, 1993, pp.199
- [6] K. H. Choi, J. W. Lee, "A Study on the Structural Performance of Post tensioned Concrete Beam and Slab subjected to High Temperature", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.29, No.2, pp.209-216, April 2017.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.2.217>
- [7] B. J. Lee, T. K. Oh, "An Introduction to Korea Standards and Relevant Nondestructive Testing for Concrete - Compressive Strength of Concrete", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.28, No.5, pp.84-87, Oct. 2016.
- [8] B. J. Lee, T. K. Oh, "An Introduction to Korea Standards and Relevant Nondestructive Testing for Concrete - Utilization and Prospect of Ultrasonic Method for Concrete Quality Control", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.28, No.6, pp. 82-86, Dec. 2016.

최 광 호(Kwang-Ho Choi)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 대학원
건축공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 연세대학교 대학원
건축공학과 (공학박사)
- 1992년 8월 ~ 1995년 12월 : 쌍
용건설 기술연구소 과장
- 1996년 3월 ~ 현재 : 남서울대학
교 건축공학과 교수

〈관심분야〉

철근콘크리트 내화성능, 프리스트레스트 콘크리트 구조