

비선형 공진기법을 이용한 콘크리트의 화재 손상 영향인자 분석

Analysis of Factors Influencing Fire Damage to Concrete Using Nonlinear Resonance Vibration Method

박강규*, 박선종*, 임홍재**, 곽효경*†

Gang-Kyu Park*, Sun-Jong Park*, Hong Jae Yim* and Hyo-Gyoung Kwak*†

초 록 본 연구에서는 비선형 음향효과를 기반으로 한 비선형 공진기법을 도입하여 콘크리트의 배합비 및 화재 손상 조건(노출온도, 손상 후 경과기간)이 화재 손상 콘크리트에 미치는 영향을 파악하였다. 도입된 비선형 공진기법을 통해 기존 선형 탄성과 기반 평가 기법 대비 향상된 민감도를 나타내는 비선형인자를 측정하였으며, 쪼갬 인장강도 측정을 통해 배합비 및 화재 손상 조건에 따른 콘크리트의 잔존재료물성 평가를 수행하였다. 얻어진 결과를 토대로 배합비, 노출온도, 손상 후 경과기간이 화재 손상 콘크리트에 미치는 영향을 분석하였다. 추가적으로 쪼갬 인장강도비와 비선형인자의 직접적인 관계를 제시하였으며, 비선형 공진기법을 이용한 화재 손상 콘크리트의 잔존 강도 추정에 대한 가능성을 확인하였다.

주요용어: 화재손상 콘크리트, 배합비, 비선형 음향효과, 손상 후 경과기간, 쪼갬 인장강도

Abstract In this study, the effects of different mix proportions and fire scenarios (exposure temperatures and post-fire-curing periods) on fire-damaged concrete were analyzed using a nonlinear resonance vibration method based on nonlinear acoustics. The hysteretic nonlinearity parameter was obtained, which can sensitively reflect the damage level of fire-damaged concrete. In addition, a splitting tensile strength test was performed on each fire-damaged specimen to evaluate the residual property. Using the results, a prediction model for estimating the residual strength of fire-damaged concrete was proposed on the basis of the correlation between the hysteretic nonlinearity parameter and the ratio of splitting tensile strength.

Keywords: Fire-Damaged Concrete, Mix Proportions, Nonlinear Acoustics, Post-Fire-Curing, Splitting Tensile Strength

1. 서 론

콘크리트는 보편적인 건설재료로, 낮은 열전도율 및 내화성이 우수한 특성을 가진다[1]. 하지만 콘크리트가 고온에 노출될 경우, 박락 및 폭열(spalling) 등의 현상으로 인한 손상을 입는다[2]. 또한, 구성 물질 간 열팽창률 차이로 인한 열응력 발생 및 시멘트 젤의 탈수 등과 같은 물리·화학적 변화로 콘크리트 내부에 미세균열(micro-cracks)이 발생하며, 이로 인해 콘크리트의 재료물성이 저하된다[1,3]. 따라서 화재에 노출된 콘

크리트 구조물의 재사용 및 보수·보강 판단을 위해 손상 평가의 필요성이 대두되었으며, 이를 평가하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[4,5]. 그 중 재료의 선형 탄성 거동에 이론적 기반을 둔 비파괴 손상 평가 기법이 사용성 및 편의성 측면에서 장점을 가진다[6]. 이를 이용하여 화재 손상 콘크리트에 적용한 대표적인 기법으로는 초음파속도측정법(ultrasonic wave velocity method) [7], 충격반향기법(impact-echo method)[8] 등이 있다. 하지만 선형 탄성 거동 기반 비파괴 기법은 콘크리트와 같은 비균질 재료의 손상을 민감하게

[Received: February 9, 2015, Revised: March 19, 2015, Accepted: March 24, 2015] *한국과학기술원 건설 및 환경공학과, **경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부, †Corresponding Author: Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST, Daejeon 305-701, Korea (E-mail: kwakhg@kaist.ac.kr)

반영하지 못하는 단점을 가지고 있다[9].

한편, 비선형 음향효과(nonlinear acoustics) 기법은 선형 탄성 거동 기반 비파괴기법에 비해 보다 민감한 손상 평가가 가능하다[3,4,9,10]. 화재 손상 콘크리트의 평가에 적용된 대표적인 비선형 음향효과 기법은 비선형 초음파 변조기법(nonlinear ultrasonic modulation method)과 비선형 공진기법(nonlinear resonance vibration method)이며[3,11,12], 이를 활용한 화재 손상 평가 및 손상 정도 추정에 대한 연구가 진행되었다. 상기 기법 중 비선형 공진기법은 실험 구성이 비선형 초음파 변조기법에 비해 간단하며, 비교적 작은 크기의 시편에서 적용이 가능한 것으로 보고된 바 있다[12].

따라서 본 연구에서는 이전 연구[12]에서 제시한 비선형 공진기법(nonlinear resonance vibration method)를 이용하여 배합비 및 손상 조건(노출 온도, 손상 후 경과기간)이 화재 손상 콘크리트에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 서로 다른 4가지 배합비의 콘크리트 시편을 제작하였으며, 각 화재 손상별 시편에 대해 비선형 공진기법을 통한 이력현상에 의한 비선형인자(hysteretic nonlinearity parameter, HNP) 및 쪼갬 인장강도(splitting tensile strength)를 측정하였다. 실험 결과를 토대로 배합비, 노출온도, 손상 후 경과기간에 따른 영향을 분석하였다. 또한, HNP와 쪼갬 인장강도의 직접적인 관계를 제시함으로써 비선형 공진기법을 이용한 화재 손상 콘크리트의 강도 추정에 대한 가능성을 파악하였다.

2. 비선형 음향효과 이론

비선형 음향효과는 비선형 응력-변형률 관계(stress-strain relationship)를 가지는 재료의 탄성파에 대한 각종 비선형적 응답을 의미한다. 대표적으로 입사파의 2차 혹은 3차 고조파(second or third harmonics), 두 개 이상의 파가 통과할 경우 발생하는 비선형 파 변조(nonlinear wave modulation), 진폭 의존적인 공진특성(amplitude-dependent resonance characteristics) 등이 있다[13]. 재료의 1차원 비선형 응력-변형률 관계를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$\sigma = \int E(\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)) d\varepsilon \quad (1)$$

여기서, σ 는 응력(stress), ε 는 변형률(strain), $\dot{\varepsilon}$ 는 변형률 속도이다. 그리고 E 는 변형률과 변형률 속도에 따른 탄성계수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)) = E_0[1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \alpha\Delta\varepsilon + \varepsilon(t)\text{sign}(\dot{\varepsilon}(t)) + \dots] \quad (2)$$

여기서, E_0 는 선형 탄성계수(linear elastic modulus), β 와 δ 는 각각 재료의 2차·3차 비선형 인자(nonlinearity parameter), α 는 재료의 이산기억(discrete memory) 및 이력현상(hysteretic effect)에 의한 비선형 인자, $\Delta\varepsilon$ 은 이전 주기에서 발생한 변형률의 양으로 $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$ 으로 나타내며, $\text{sign}(\dot{\varepsilon}(t))$ 는 변형률의 부호로 $\varepsilon > 0$ 일 때 $\text{sign}(\dot{\varepsilon}(t)) = 1$, $\varepsilon < 0$ 일 때 $\text{sign}(\dot{\varepsilon}(t)) = -1$ 이다[14,15].

비선형 공진기법은 진폭 의존적인 공진 특성인 입력신호(input signal)의 세기에 따른 공진주파수의 변화(amplitude-dependent resonance frequency shift), 고조파(harmonics)의 생성, 감쇠량(attenuation)의 증가 등을 통한 비선형성의 측정으로 재료의 손상 정도를 평가하는 기법이다[15]. 본 연구에서는 입력신호의 세기에 따른 공진주파수의 측정을 통해 콘크리트의 화재 손상을 평가하였다. 화재 손상 콘크리트의 내부 공극 및 균열 등으로 파의 왜곡(distortion)이 발생하며, 이는 입력신호 세기에 따른 공진주파수의 변화로 나타난다[16]. 입력신호 세기에 따른 공진주파수의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다[12,15,17].

$$\frac{f_0 - f}{f_0} \approx \lambda_1 \cdot \Delta\varepsilon \quad (3)$$

여기서, f_0 는 선형 공진주파수(linear resonance frequency)로 입력신호의 세기가 가장 작을 때 측정되는 공진주파수이며, f 는 입력 세기에 따라 측정된 공진주파수를 말한다. 또한, λ_1 는 이력현상에 의한 비선형인자(HNP)로 α 에 비례하며, $\Delta\varepsilon$ 은 입력신호 세기에 비례한다. 입력신호에 따른 공진주파수의 변화는 콘크리트의 손상 정도와 밀접한 연관이 있으며[13], 이를 통해 측정된 식(3)의 HNP는 손상 지표로 사용할 수 있다.

3. 실험

3.1. 콘크리트 시편 제작

콘크리트의 배합비는 기존 선행 연구와 동일한 배합을 사용했으며[12], 이를 Table 1에 나타내었다. 크기 $\Phi 100 \times 200$ mm의 콘크리트 공시체를 제작하였다. Table 1에서 W는 물, C는 시멘트, S는 최대치수 5 mm 이하의 표면 건조 상태의 잔골재, G는 최대치수 19 mm 이하의 표면 건조 상태의 부순 굵은 골재, W/C 및 S/G는 각각 물-시멘트비, 골재비이다. 각 재료의 비중은 시멘트가 3.15, 잔골재는 2.31, 굵은 골재는 2.73이다. 모든 공시체는 콘크리트 타설 24시간 후 탈형하여 20°C에서 28일 수중양생 하였다. 양생 후 각 공시체를 25 mm 두께로 잘라 시편을 제작하였다. 콘크리트 시편의 폭열을 방지하기 위해 80°C로 하루 동안 건조시킨 후 전기로(electric muffle furnace)를 통해 고온에 노출시켰다. 노출 온도는 200°C, 400°C, 600°C, 800°C로 설정하였으며, 노출 시간은 1시간으로 일정하게 유지하였다. 그리고 손상 직후 시편을 상온의 물로 냉각하였다. 한편, 손상 후 경과기간에 따른 콘크리트 HNP 및 물성의 변화를 확인하기 위해 손상 후 경과기간을 1주일, 1개월, 6개월, 12개월로 설정하였으며, 이 기간 동안 시편은 기건 상태로 보관되었다.

3.2. 비선형 공진기법 실험

본 연구에서 사용한 비선형 공진기법의 개요도는 Fig. 1과 같으며, 기존 제시된 기법과 실험 구성이 동일하다[12]. 시편의 자유진동을 유도하고, 외부로부터의 영향을 최소화하기 위해 콘크리트 시편 대비 낮은 강성의 매트(soft mat)를 설치하였다[18]. 가속도계(PCB353B15; PCB Piezotronics Inc.)를 시편 중앙에 부착하여 충격의 세기에 따른 시편의 공진주파수를 측정하였다. 시편 반대편 중앙에 쇠구슬(무게 13.8g)을 다양한 높이에서 떨어뜨림으로써 충격 세기에 따른 공진주파수를 얻었다. 공진 신호는 동적 신호 수집 모듈(dynamic signal acquisition module, National Instruments Corp, NI PXI 4472B)을 이용하여 초당 샘플 측정수는 100ks/s, 측정시간은 50 ms 동안 측정하였다. 계측된 시간 영역 응답 결과는

Table 1 Mix proportion of concrete (kg/m³)

Label	W	C	S	G	W/C	S/G
A	160	320	744	1100	0.50	0.68
B	171	285	744	1100	0.60	0.68
C	160	320	922	922	0.50	1.00
D	171	285	922	922	0.60	1.00

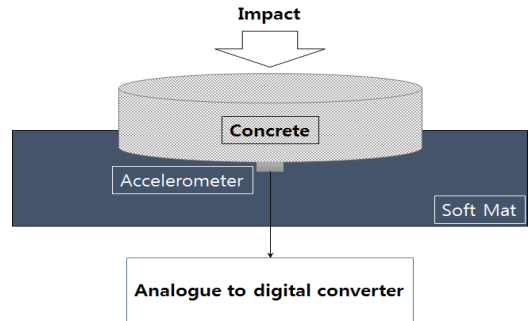


Fig. 1 Experimental setup of nonlinear resonance vibration method

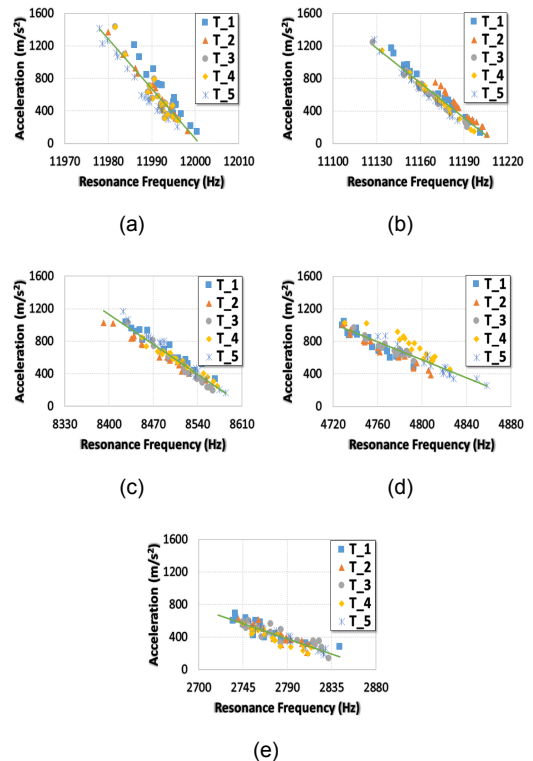


Fig. 2 Representative experimental results of linear resonance frequency: (a) Ref, (b) 200°C, (c) 400°C, (d) 600°C, (e) 800°C (mix proportion: A, post-fire-curing period: 1week)

FFT(fast Fourier transform)를 통해 주파수 영역 응답으로 변환하였다. 각 시편별로 서로 다른 세기의 충격을 20회씩 가하였으며, 이를 5회 반복하였다. 손상 온도별 시편에 대해 비선형 공진기법을 5회 반복하여 충격 세기(가속도 크기)에 따른 공진주파수(f)의 변화를 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 비선형 공진기법을 통해 측정된 대표적인 결과는 Fig. 2와 같다. 이를 통해 충격 세기(가속도 크기)의 증가에 따라 공진주파수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 식(3)의 선형 공진주파수(f_0)는 선형 회귀 분석(linear regression analysis)을 통해 Fig. 2의 x축 절편 값으로 구하였다. 결과로부터 노출 온도가 증가할수록 선형 회귀 분석을 통해 측정된 선형 공진주파수는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 각 손상별 시편에서 측정된 선형 공진주파수를 기준으로, 충격 세기에 따른 공진주파수의 변화 정도($(f_0 - f)/f$)를 파악할 수 있다. 그 후 입력 세기에 비례하는 $\Delta\varepsilon$ 과의 관련성을 파악하여 식(3)의 손상 평가 인자인 HNP(λ_1)를 산출하였다.

3.3. 쪼갬 인장강도 실험

콘크리트의 배합비와 화재 손상 조건이 잔존 재료물성에 미치는 영향을 파악하기 위해 쪼갬 인장강도를 측정하였다. 이전 연구에 따르면 인장강도의 측정이 압축강도 측정에 비해 온도의 영향을 민감하게 반영 가능한 것으로 보고되었다 [1]. 쪼갬 인장강도는 ASTM C496-11에 제시된 실험 구성을 통해 측정되었으며, 쪼갬 인장강도를 구하는 식은 다음과 같다[19].

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (4)$$

여기서, T 는 쪼갬 인장강도(MPa), P 는 최대하중(N), l 은 시편의 길이(mm), d 는 시편의 직경(mm)이다. 측정된 결과로부터 화재 손상 전후 쪼갬 인장강도비를 산출하여 배합비, 노출 온도, 손상 후 경과기간에 따른 잔존재료물성 변화를 파악하였다.

4. 결과 및 분석

4.1. 배합비의 영향

배합비는 Table 1에 나타난 바와 같이 각 배합별로 물-시멘트비 및 골재비의 차이를 두었다. 주어진 배합비가 화재 손상에 미치는 영향을 파악하기 위해 측정된 HNP와 노출 온도의 관계를 Fig. 3에 나타내었으며, 쪼갬 인장강도비와 노출 온도의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 여기에서 HNP 및 쪼갬 인장강도비는 동일한 조건(배합비, 노출 온도, 손상 후 경과기간)의 시편 5개에서 측정된 실험값을 평균한 결과이다.

먼저 모든 조건에서 노출 온도가 증가함에 따라 측정된 HNP는 증가하며(Fig. 3), 특히 400°C 이상에서 상대적으로 급격한 증가를 보인다. 이는 화재에 의한 콘크리트 내부 미세균열의 발생 및 균열의 심화에 따른 것으로 보인다[3]. 한편, 본 연구에서 배합 A, B와 배합 C, D는 물-시멘트비에 차이를 두고 배합 A, C와 배합 B, D는 골재비를 달리하여, 화재 손상 콘크리트에 물-시멘트비와 골재비가 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 하지만 측정된 HNP의 결과로부터 물-시멘트비 및 골재비에 따른 영향이 뚜렷하게 드러나지 않는 것으로 나타났다.

측정된 쪼갬 인장강도비는 모든 조건에서 노출 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4). 특히, 쪼갬 인장강도비가 200°C에서 600°C 구간에서 노출 온도 증가에 따라 급격하게 감소하지만, 600°C 이상 구간에서는 감소폭이 줄어드는 것을 보인다. 600°C 이상의 온도에 노출된 콘크리트의 쪼갬 인장강도비가 0.25 이하로 나타나며, 이를 통해 600°C 이상의 온도에 노출된 콘크리트는 구조적인 기능을 수행하기 어려운 것으로 판단할 수 있다. 또한, HNP 측정 결과와 같이, 물-시멘트비 및 골재비에 따른 쪼갬 인장강도비의 경향성은 뚜렷하게 보이지 않는다. 결과를 종합해 볼 때, 본 연구에서 고려한 물-시멘트비 및 골재비가 화재 손상 콘크리트에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다.

4.2. 손상 후 경과기간의 영향

화재 손상 후 콘크리트 시편은 기건 상태로 1주일(7D), 1개월(1M), 6개월(6M), 12개월(12M) 동안 보관하여 손상 후 경과기간에 따른 영향을 파악하고자 하였다. 주어진 경과기간에 따른 노출 온도와 HNP 및 쪼갬 인장강도의 결과를 Fig. 5,

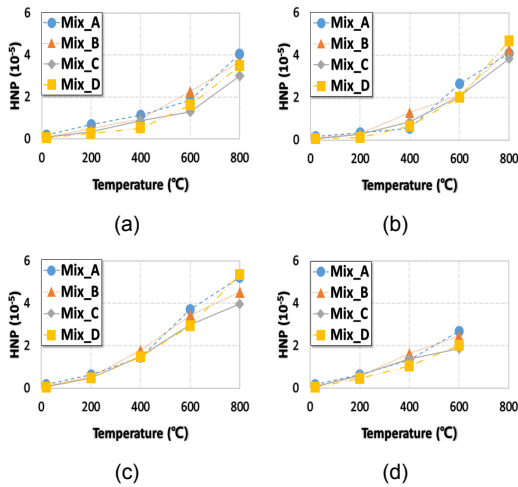


Fig. 3 Relation between HNP and exposed temperature: (a) 7 days, (b) 1 month, (c) 6 months, (d) 12 months

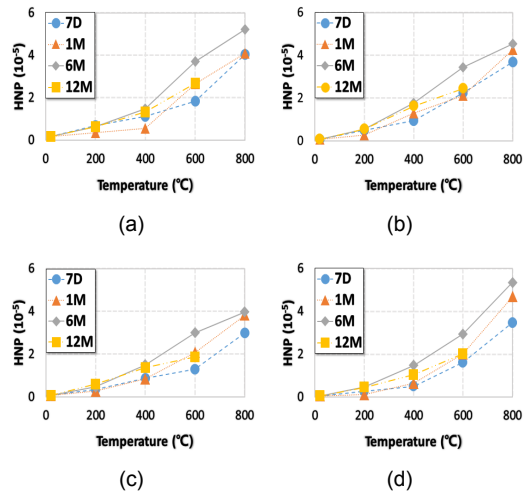


Fig. 5 Relation between HNP and exposed temperature: (a) Mix A, (b) Mix B, (c) Mix C, (d) Mix D

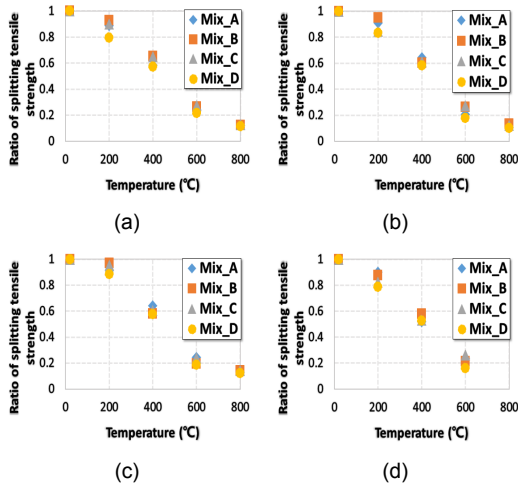


Fig. 4 Relation between HNP and exposed temperature: (a) 7 days, (b) 1 month, (c) 6 months, (d) 12 months

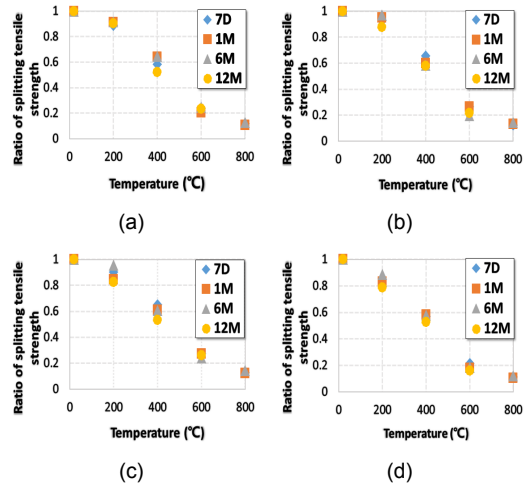


Fig. 6 Relation between HNP and exposed temperature: (a) Mix A, (b) Mix B, (c) Mix C, (d) Mix D

Fig. 6에 각각 나타내었다. HNP는 노출 온도에 따라 계속적으로 증가하는 경향을 보이며, 이는 배합비별 결과(Fig. 3)와 유사하다. 한편, 경과기간에 따른 HNP는 손상 후 6개월 시편의 결과가 상대적으로 크게 측정되었으나, 다른 경과기간을 고려해 보았을 때 경과기간에 따른 일관된 경향성은 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구의 보관 조건인 공기 중 양생에서는 화재로 인한 손상의 회복이 거의 발생하지 않은 것으로 사료된다.

조깅 인장강도비도 배합비별 결과(Fig. 4)와 유사하게 노출 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 또한, 측정된 조깅 인장강도비는 손상 후 경과기간에 무관하게 유사한 결과를 보인다. 이는 경과기간에 따른 화재 손상이 회복되지 않음을 의미하며, 이는 앞선 손상 후 경과기간에 따른 HNP의 결과와 유사함을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 기건 양생조건에서는 경과기간에 따른 재료물성 및 손상의 회복이 발생하지 않음을 확인할 수 있으며, 이와 같은 현

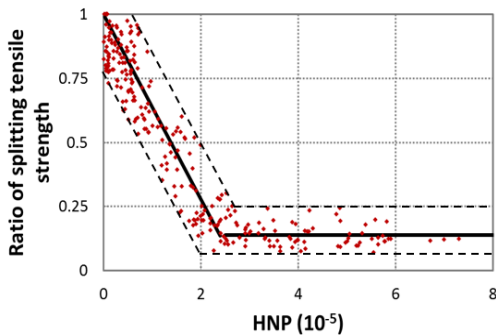


Fig. 7 Correlation between ratios of the splitting tensile strength and HNP

상은 다른 연구에서도 찾아볼 수 있다[7].

4.3. HNP와 쪼갬 인장강도비의 관계

앞선 결과를 통해 쪼갬 인장강도비와 HNP는 본 연구에서 사용한 배합비와 손상 후 경과기간에 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 모든 시편에서 측정된 HNP와 쪼갬 인장강도비의 결과를 배합비, 손상 후 경과기간과 노출 온도에 상관없이 Fig. 7에 나타내었으며, 이를 통해 두 인자 사이의 직접적인 관계를 파악하였다. 결과로부터 HNP가 0부터 2.5×10^{-5} 구간에서는 HNP의 증가에 따라 쪼갬 인장강도비가 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 하지만 이 구간 후부터는 HNP의 증가에도 불구하고 쪼갬 인장강도비의 값은 큰 변화가 없는 것으로 나타난다. 이 구간에 해당하는 콘크리트의 경우, 쪼갬 인장강도비가 약 0.25 정도를 나타내며, 구조적인 기능을 더 이상 수행하기 어려운 상태로 판단된다. 또한, 제시된 HNP와 쪼갬 인장강도비의 관계를 화재 손상 콘크리트의 잔존 강도 추정에 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 비선형 공진기법을 이용하여 배합비 및 손상 조건(노출 온도, 손상 후 경과기간)이 화재 손상 콘크리트에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 측정된 화재 손상 콘크리트의 쪼갬 인장강도비와 HNP의 직접적인 관계를 제시함으로써 비선형 공진기법을 이용한 화재 손상 콘크리트의

강도 추정에 대한 가능성을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 비선형 공진기법을 통해 충격 세기에 따른 화재 손상 콘크리트 시편의 공진주파수 변화를 측정하였으며, 이를 통해 손상 평가 인자인 HNP를 산출하였다. 결과를 토대로 노출 온도 증가에 따라 측정된 HNP가 증가하였으며, 쪼갬 인장강도비는 감소하는 경향을 보인다. 특히, 600°C 이상의 경우 쪼갬 인장강도비가 0.25 이하로 측정되며, 구조적인 기능을 수행하기 어려운 것으로 판단된다.
- 2) 배합비(물-시멘트비, 골재비) 및 손상 후 경과기간이 콘크리트의 화재 손상에 미치는 영향을 HNP 및 쪼갬 인장강도의 측정을 통해 분석하였다. 그러나 HNP 및 쪼갬 인장강도비는 배합비(물-시멘트비, 골재비)의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 두 측정값과 손상 후 경과기간 사이의 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았으며, 이를 통해 기건 상태에서는 경과기간에 상관없이 콘크리트의 화재 손상이 거의 회복되지 않음을 확인할 수 있었다.
- 3) 측정된 결과를 토대로 HNP와 쪼갬 인장강도비의 직접적인 관계를 도출하였다. 이는 화재 노출 온도, 배합비(물-시멘트비, 골재비), 손상 후 경과기간에 상관없는 결과로, 비선형 공진기법을 이용한 화재 손상 콘크리트의 잔존 강도 추정에 대한 가능성을 확인할 수 있으며, 향후 화재 손상을 입은 콘크리트 구조물의 보다 정확한 손상평가 및 재료물성 추정에 직접적으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Z. P. Bazant and M. F. Kaplan, "Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models," Longman Group Limited, England, (1996)

- [2] M. Colombo and R. Felicetti, "New "NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures," *Fire Safety Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 461-472 (2007)
- [3] H. J. Yim, J. H. Kim, S. J. Park and H. G. Kwak, "Characterization of thermally damaged concrete using a nonlinear ultrasonic method," *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 11, pp. 1438-1446 (2012)
- [4] S. J. Park, H. J. Yim and H. G. Kwak, "Evaluation of microcracks in thermal damaged concrete using nonlinear ultrasonic modulation technique," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 651-658 (2012)
- [5] M. Y. Chew, "The assessment of fire damage concrete," *Building and Environment*, Vol. 28, No. 1, pp. 97-102 (1993)
- [6] H. J. Yim, S. J. Park and H. G. Kwak, "Nonlinear acoustic methods for nondestructive evaluation of damaged concrete structures," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 17, No. 3, pp. 47-55 (2013)
- [7] H. Yang, Y. Lin, C. Hsiao and J. Y. Liu, "Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity," *Fire Safety Journal*, Vol. 44, No. 1, pp. 121-130 (2009)
- [8] G. Epasto. E. Proverbio and V. Venturi, "Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method," *Materials and structures*, Vol. 43, No. 1-2, pp. 235-245 (2010)
- [9] A. Shah and Y. Ribakov, "Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation," *Materials & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 4095-4102 (2009)
- [10] I. Y. Solodov, "Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1, pp. 383-390 (1997)
- [11] H. J. Yim, S. J. Park, J. H. Kim and H. G. Kwak, "Nonlinear ultrasonic method to evaluate residual mechanical properties of thermally damaged concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 111, No. 1-6 (2014)
- [12] S. J. Park, H. J. Yim and H. G. Kwak, "Nonlinear resonance vibration method to estimate the damage level on heat-exposed concrete," *Fire Safety Journal*, Vol. 69, pp. 36-42 (2014)
- [13] K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135 (2009)
- [14] K. A. Van Den Abeele, P. A. Johnson and A. Sutin, "Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS)," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, No. 1, pp. 17-30 (2000)
- [15] K. A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate and P. A. Johnson, "Nonlinear elastic wave spectroscopy(NEWS) techniques to discern material damage, part II: single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy," *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, No. 1, pp. 31-42 (2000)
- [16] K. J. Leśnicki, J. Y. Kim, K. E. Kurtis and L. J. Jacobs, "Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique," *NDT & E International*, Vol. 44, No. 8, pp. 721-727 (2011)
- [17] J. Chen, A. R. Jayapalan, J. Y. Kim, K. E. Kurtis and L. J. Jacobs, "Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 914-923 (2010)
- [18] M. L. Leming, J. M. Nau and J. Fukuda, "Non-destructive determination of the dynamic modulus of concrete disks," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 1, pp. 50-57 (1998)
- [19] ASTM C496/C96M-11, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," American Society of Testing and Material (2012)