Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 17, No. 5, September 2013, pp.105-112
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2013.17.5.105

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가에 있어서 충격-반향 기법의 적용성

Applicability of Impact-Echo Method for Assessment of Residual Strength of Fire-Damaged Concrete

신 성 우[1)] 김 승 용[2)] 김 정 수[3)*]
Sung-Woo Shin Seung-Yong Kim Jeong-Su Kim

Abstract

In this study, the applicability of impact-echo method for assessment of residual strength of fire-damaged concrete is investigated. A series of standard fire test is performed to obtain fire-damaged concrete specimens. Impact-echo tests are executed on the specimens and the responses are analyzed. Compressive strengths of the fire-damaged concrete are evaluated and correlated with the ultrasonic wave velocities determined from the impact-echo responses. The effectiveness of impact-echo based ultrasonic wave velocity measurement for assessment of residual strength of fire-damaged concrete is discussed.

Keywords : Impact-Echo method, Fire-damaged concrete, Residual strength assessment, Ultrasonic wave velocity

1. 서 론

콘크리트는 화재와 같은 고온 상황에 노출될 시에 열화학적 반응에 의한 구성 성분의 화학적 변이와 함께 열변형에 의한 내부 구조의 변화가 발생하며, 이로 인해 콘크리트의 역학적/내구적 성능이 크게 저하된다. 특히, 화재에 따른 콘크리트의 강도 저하는 화재 규모나 고온 지속 시간 등의 가열 조건에 따라서 강도 저하 정도가 달라지기 때문에, 화재 후 콘크리트 구조물의 안전성 검토나 보수/보강 판단을 위해서는 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가가 필요하다.

화해된 콘크리트의 잔존 강도를 평가하기 위해 실무에서는 주로 현장에서 채취한 코어의 압축 시험을 통한 직접 강도 평가법이 사용되고 있다. 직접 평가법의 경우 잔존 강도 평가에 있어서 정확성과 신뢰성이 매우 높은 결과를 얻을 수 있으나, 코어 채취 과정에서 현장 구조물에 추가적인 손상이 가해진다는 점과 코어를 채취한 부위에 대한 잔존 강도만을 알 수 있기 때문에 화재 손상 범위가 광범위할 경우 여러 부위에서 다량의 코어 채취가 필요한 문제점이 있다. 이에 따라 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가에 코어 채취가 필요 없는 비파괴검사 기법의 도입을 모색하는 연구가 많이 이루어져 왔다.

일반적으로 콘크리트의 압축 강도와 초음파 속도는 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 배경에서 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가에도 초음파 속도를 적용하고자 하는 시도가 많이 이루어지고 있다. 초음파 속도를 이용하여 화해된 콘크리트의 잔존 강도를 평가하기 위해서는 (1) 화해된 콘크리트의 잔존 강도와 초음파 속도와의 상관관계 모델과 (2) 화해된 콘크리트의 정확한 초음파 속도 계측이 필요하다. 기존에는 화해된 콘크리트의 잔존 강도와 초음파 속도와의 정확한 상관관계를 규명하기 위한 연구가 주를 이루었으며, 이로부터 초음파 속도로부터 화해된 콘크리트의 잔존 강도를 추정할 수 있는 강도 추정 모델이 여럿 제안되기도 하였다. 한편 화해된 콘크리트에서 초음파 속도를 정확하게 계측하는 방법은 그 중요성에도 불구하고 일반 콘크리트에 대한 초음파 속도 계측법인 초음파 전달 시간 측정법을 주로 이용하고 있다. 초음파 전달 시간 측정법은 초

1) 정회원, 부경대학교 안전공학과 부교수, 공학박사
2) 정회원, 한화건설 기술연구소 선임연구원, 공학석사
3) 정회원, 한화건설 기술연구소 선임연구원, 공학박사, 교신저자

* Corresponding author : jskim96@hanwha.co.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2013 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

음파가 매질을 전파하는데 걸리는 시간을 구하여 이를 바탕으로 초음파 속도를 산정하게 되며, 측정된 시간 영역 초음파 신호에서 초음파의 시작 시점과 도달 시점을 명확하게 구분할 수 있을 경우 매우 정확한 초음파 속도의 계측이 가능하다. 그러나 이 방법은 초음파의 산란으로 인해 계측된 신호에서 초음파 신호의 시작 시점과 도달 시점이 명확하게 구분되지 않을 경우 시험자의 주관적 판단에 의해 초음파 전달 시간이 자의적으로 결정될 수 있고, 이로 인해 초음파 속도와 잔존 강도 간의 정확한 상관관계를 알고 있더라도 실험자에 따라 잔존 강도 평가 결과가 크게 왜곡될 수 있다. 이에 따라 화해된 콘크리트의 초음파 속도를 초음파 전달 시간 측정법으로 계측하는 경우 초음파 산란을 줄이기 위해 50-150 (kHz) 대역의 초음파가 주로 이용되고 있으나, 화해된 콘크리트는 고온에 노출된 정도에 따라 50-150 (kHz) 대역의 초음파도 매우 큰 산란이 일어나는 내부 구조 변화가 발생할 수 있기 때문에, 화해된 콘크리트의 초음파 속도 계측에 초음파 전달 시간 측정법은 신뢰성이 높지 않다.

이 연구에서는 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가를 위한 초음파 속도 계측에 있어서 충격-반향 기법의 적용 가능성을 알아보고자 한다. 이를 위해 단열 패널이 부착된 콘크리트 실험체에 대해 표준 화재온도 가열 시험 및 충격-반향 시험을 실시하여 가열 조건에 따른 충격-반향 응답 특성을 분석하고, 또한 충격-반향 응답으로부터 구한 초음파 속도와 잔존 압축 강도와의 상관관계를 분석하고자 한다.

2. 충격-반향 기법

이 연구에서는 화해된 콘크리트의 초음파 속도 계측에 충격-반향 기법을 적용하고자 한다. 충격-반향 기법은 콘크리트 구조물 내부 결함 위치 탐지를 목적으로 개발되었으며 구조체의 공진 현상에 이론적인 기반을 두고 있다. 충격-반향 기법의 자세한 내용은 문헌을 참조하도록 하고, 여기에서는 충격-반향 기법을 이용하여 초음파 속도를 구하는 방법만 간단히 소개하도록 하겠다.

콘크리트 구조체의 상부 면에 충격력을 가하여 생성 전파되는 초음파는 구조체 하부 면에서 반사되어 반향파를 형성하고, 또한 이 반향파는 다시 상부 면으로 전파되어 다시 반사되는 작용이 반복적으로 이어진다. 이러한 초음파의 반복 반사 작용에 의해 콘크리트 구조체는 두께 방향 공진이 발생하며, 두께 방향 공진 주파수와 콘크리트 구조체 두께는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$D = \beta \frac{V_p}{2f_r} \tag{1}$$

여기에서, D는 콘크리트 두께, β는 구조체 형상 계수, V_p는 초음파 속도, f_r은 두께 방향 공진 주파수이다. 식 (1)을 초음파 속도에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$V_p = \frac{2f_r D}{\beta} \tag{2}$$

따라서 콘크리트 구조체의 두께를 미리 알고 있고 충격-반향 응답으로부터 콘크리트 구조체의 두께 방향 공진 주파수를 구할 수 있다면, 식 (2)를 이용하여 콘크리트의 초음파 속도를 구할 수 있다. 충격-반향 기법으로 콘크리트의 초음파 속도를 구하는 방법과 기존의 초음파 전달 시간 측정법의 가장 큰 차이점은 초음파 속도를 시간 영역 응답에서 전달 시간으로부터 구하는 것이 아니라 주파수 영역 응답에서 공진 주파수로부터 구한다는 것이다.

3. 실험 내용 및 방법

3.1 표준 화재 온도 가열 실험

콘크리트의 화해를 모사하기 실험체를 준비하여 표준 화재 온도 가열 시험을 실시하였다. 가열 시험 과정에서 실험체의 폭렬을 방지하기 위해 두께 20mm의 단열 패널을 실험체의 표면에 부착하였으며, 단열 패널 부착으로 인한 실험체 표면과 내부의 온도 gradient를 최소화하기 위해 실험체는 가로와 세로가 각각 100mm이고, 높이가 200mm인 직육면체로 일반적인 공시체의 크기보다는 다소 작게 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트 배합은 Table 1과 같으며,

Table 1 Concrete Mixture Design

W/C ratio	S/a	Unit Weight (kg/m^3)				
		Water	Cement	Fine Aggregates	Coarse Aggregates	Super-plasticizer
0.35	44%	165	471	764	999	5.65

굵은 골재의 최대 직경은 10mm로 하였다.

실험체는 총 20개를 제작하여 28일 동안 수중 양생하였으며, 수분 상태를 일정하게 유지하기 위해 모든 시험체는 28일 양생 종료 후 온도와 습도가 일정하게 유지되는 양생실에 보관하고 가열 시험 24시간 전에 양생실에서 꺼내어 대기 건조하였다. 표준 화재 온도 가열 시험은 온도 제어가 가능한 전기로 (Electric Furnace)를 이용하였으며, KS F 2257에 규정된 표준 화재 온도 곡선 (식 (3))을 이용하여 전기로 내의 가열 온도를 제어하였다.

$$T = 345\log(8t+1)+20 \quad (3)$$

여기에서, t는 시간 (시)이며, T는 가열로 내의 평균 온도 (℃)이다. 콘크리트의 고온 수열 정도를 달리하기 위해 가열 지속 시간을 30분, 60분, 120분, 180분의 네 가지 경우로 나누어 가열 시험을 실시하였으며, 각 경우마다 4개의 실험체를 동시에 가열하였다. 또한 각 4개의 실험체 중 1개는 내부 중앙부와 외부 표면에 열전대를 설치하여 실험체의 수열 온도 측정에 이용하였으며, 나머지 3개를 충격-반향 실험 및 잔존 압축 강도 실험에 이용하였다. 가열 지속 시간이 종료된 실험체의 냉각 과정에서 급속한 냉각에 의한 열손상을 방지하기 위해, 가열 시험 종료 후 가열로 내에서 시험체를 자연 냉각하여 실험체의 표면 온도가 상온에 이르렀을 때 실험체를 가열로에서 빼내었으며, 이후 충격-반향 실험과 잔존 압축 강도 실험을 실시하였다.

3.2 충격-반향 실험 및 압축 강도 실험

무가열 실험체와 가열 시험 후 자연 냉각된 실험체에 대해 충격-반향 실험과 압축 강도 실험을 실시하였다. 충격-반향 실험 과정에서 충격력은 Tip 사이즈가 5mm인 충격해머를 이용하였으며, 응답 신호의 측정은 Flat 주파수 대역이 1-35 (kHz)인 초소형가속도계 (PCB Inc. Model : 352A60)를 이용하였다 (Fig. 1). 신호의 샘플링 간격은 10μs로 설정하고 총 40ms 동안 신호를 측정하였으며, 측정된 신호는 A/D 변환하여 컴퓨터에 저장하였다. 충격-반향 응답에서 비일관성 (incoherent) 잡음의 영향을 줄이기 위해 각 실험체 별로 5회의 충격-반향 실험을 실시하고 이에 대한 평균 값을 구하여 해당 실험체의 충격-반향 응답으로 결정하였다. 마지막으로 각 실험체의 충격-반향 응답에서 공진주파수에 해당하는 주파수 성분을 구하고, 식 (2)를 이용하여 각 실험체의 초음파

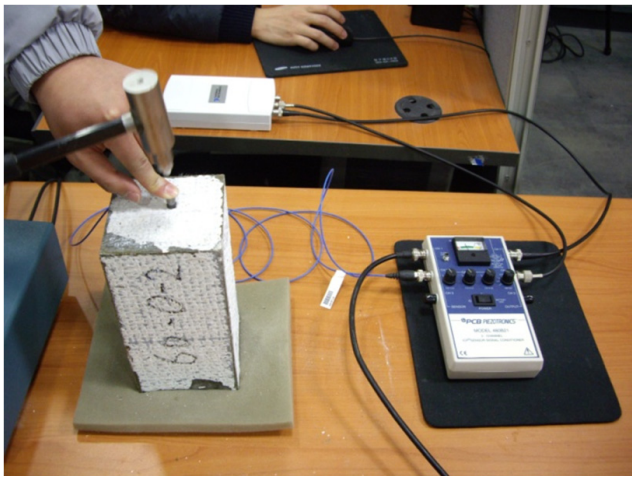


Fig. 1 Impact-Echo Test

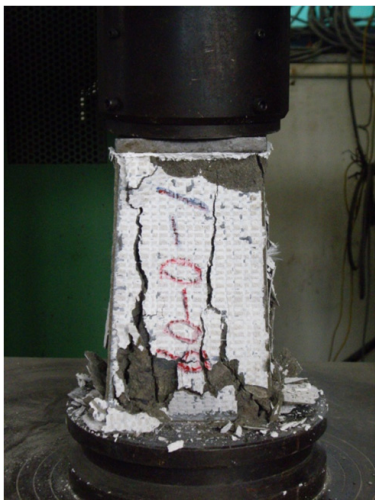


Fig. 2 Compressive Strength Test

속도를 결정하였다. 한편, 가열 및 무가열 실험체의 압축 강도를 구하기 위해 충격-반향 실험 종료 후 일축 압축 시험을 실시하였다. 일축 압축 시험은 변위 제어 방식 (1mm/min)으로 실시하였으며, 가력 하중이 최대 크기에 도달한 후 최대 값의 90% 수준으로 하강하였을 때 압축 시험을 종료하였다 (Fig. 2). 압축 강도는 최대 하중 값을 가압면의 단면적으로 나누어 구하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 화해된 콘크리트의 강도 잔존 특성

가열 지속 시간 30분, 60분, 120분, 180분에 대한 표준 화재 온도 가열 시험을 실시하고, 가열 시험이 종료된 실험체

Table 2 Compressive Strength Test Results

Specimen No.	Heating Time (Maximum Temperature)	Measured Strength (MPa)	Average Strength (MPa)
N-1	No Heating (at room temp. : 25℃)	28.68	30.06
N-2		28.90	
N-3		32.59	
H30-1	30 min (64℃)	28.81	29.75
H30-2		30.97	
H30-3		29.47	
H60-1	60 min (104℃)	25.54	25.50
H60-2		26.10	
H60-3		24.87	
H120-1	120 min (249℃)	14.74	15.47
H120-2		15.20	
H120-3		16.48	
H180-1	180 min (903℃)	7.53	7.86
H180-2		8.01	
H180-3		8.03	

에 대하여 압축 강도 실험과 충격-반향 실험을 실시하였다. Table 2는 압축 강도 실험 결과를 나타내며, Fig. 3은 실험체 내부의 수열 온도 측정 결과를 나타낸다.

내부 수열 온도의 상승이 최대 100℃ 정도인 가열 지속 시간 60분까지는 평균 압축 강도에 변화가 없거나 약간의 저하가 발생하였으나, 이후 평균 압축 강도의 저하가 매우 크게 발생하였다. 특히, 가열 지속 시간이 120분에 이르렀을 때에는 내부 수열 온도는 약 250℃ 정도임에도 불구하고 평균 압축 강도는 무가열 시험체에 비하여 절반 가까이 저하되었으며, 180분에 이르렀을 때에는 강도의 잔존율이 무가열 시험체의 1/4 수준으로 저하되었다. 콘크리트의 고온 가열에 따른 압축 강도 잔존율은 대개 100℃ 이하에서는 일반적으로 경미한 감소 (즉, 높은 압축 강도 잔존율)를 보이다가 200℃ 부근에서 본격적인 감소가 나타나고, 이후 약 400℃에 이르기까지 60% 정도로 감소되다가 600℃에서 25-40 (%) 정도의 압축 강도 잔존율이 나타나는 것으로 알려져 있으며, 이 연구에서도 이와 유사한 결과가 나타났다.

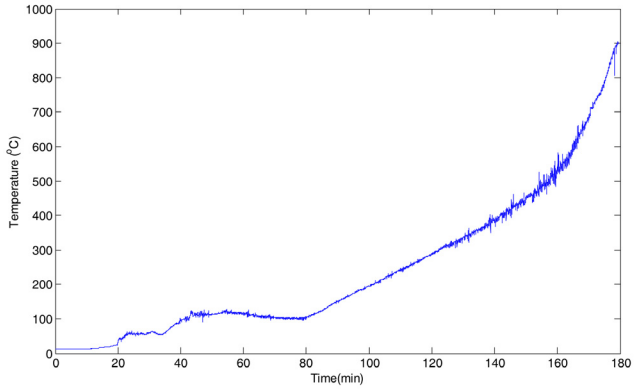
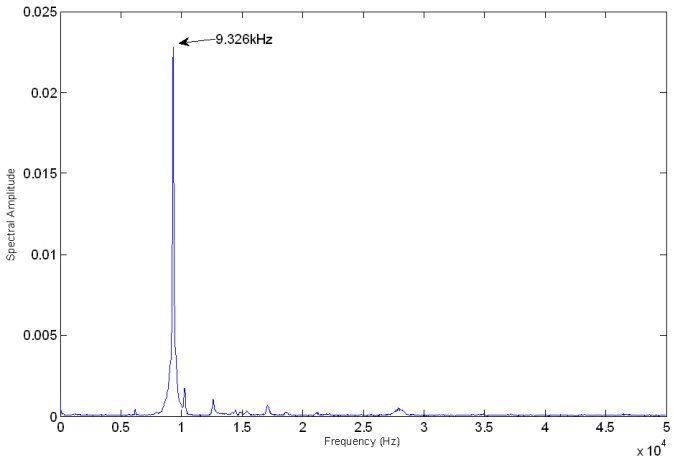


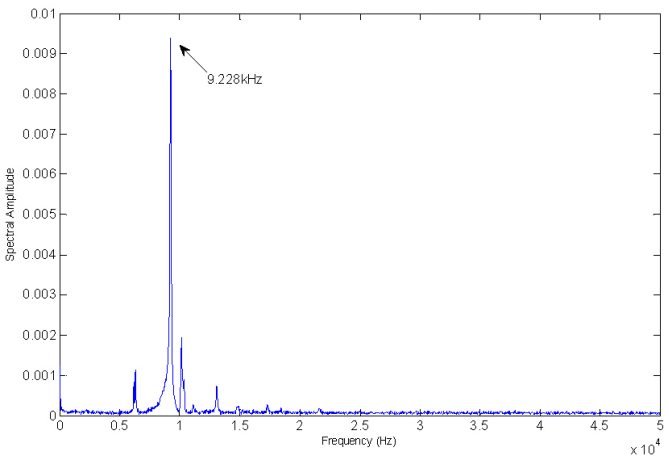
Fig. 3 Temperature Response (180 min case)

4.2 화해된 콘크리트의 충격-반향 응답 특성

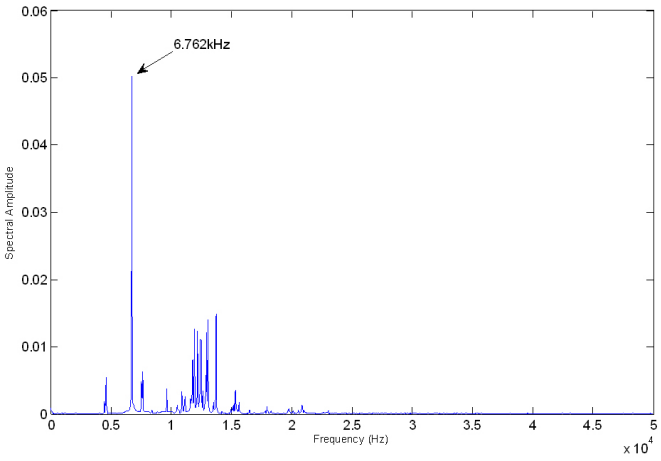
Fig. 4(a)-(e)는 각 실험체의 주파수 영역 충격-반향 응답 결과를 나타낸다. 가열 지속 시간이 길어질수록 고온 수열에 따른 내부 구조 변화로 인해 충격-반향 응답에 잡음 성분의 영향이 점점 커지지만, 이러한 내부 구조 변화에도 불구하고 매우 큰 크기의 공진주파수가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한 내부 수열 온도가 커질수록 공진주파수의 위치가 저주파 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 가열에 의해 콘크리트의 내부 수열 온도가 증가하게 되면, 이에 따라 콘크리트의 역학적 특성과 내부 구조의 변화가 발생하게 된다. 콘크리트의 역학적 특성 변화는 초음파 속도에 주로 영향을 미치고 내부 구조의 변화는 초음파 산란에 주로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 Fig. 4의 충격-반향 응답에서 공진주파수의 이동은 콘크리트의 역학적 특성 변화에 기인하는 것으로 판단할 수 있으며, 잡음 성분의 증가는 미세 균열의 성장이나 공극의 증가와 같은 내부 구조 변화로 인해 초음파의 산란이 증가하였기 때문으로 판단할 수 있다. Fig. 4에서 특히 주목할 만한 점은 수열 온도가 높을수록 초음파 산란이 증가함에도 불구하고 이러한 산란이 공진주파수의 위치에는 큰 영향을 주지 않고 공진주파수 성분과 잡음 성분의 상대적 크기에만 영향을 미친다는 점이다. 충격-반향



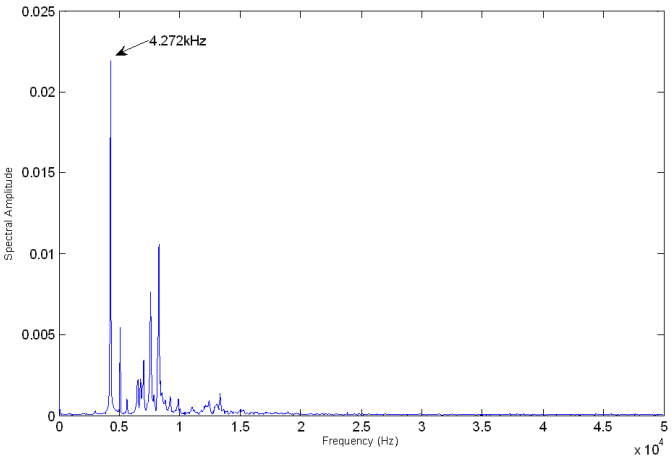
(a) No Heating



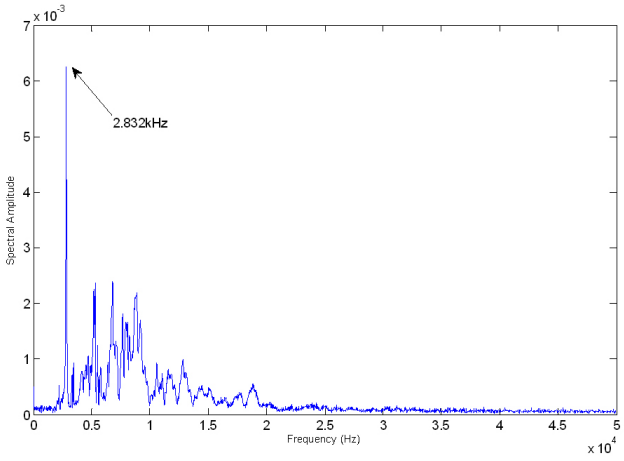
(b) 30 Minutes Heated



(c) 60 Minutes Heated



(d) 120 Minutes Heated



(e) 180 Minutes Heated

Fig. 4 Impact-Echo Responses of Heated Concrete Specimens

응답의 이러한 특성은 화해된 콘크리트의 초음파 속도 계측에 있어서 시험자의 주관적 판단을 배제하는 것이 가능하다는 중요한 의미를 가진다. 앞서 설명하였듯이 초음파 전달 시간 측정법의 경우 초음파 속도 계측에 시험자의 주관적 판단을 배제하기 위해서는 시간 영역 초음파 신호에서 초음파 전달 시점을 명확하게 구별할 수 있어야 하지만, 계측된 신

호에 잡음이 많아 초음파 전달 시점이 불명확할 경우에는 시험자의 주관적 판단을 배제하고 초음파 전달 시점을 결정하기 어려운 문제점이 있다. 그러나, 충격-반향 응답의 경우 고온 수열에 의해 내부 구조가 변화하여 초음파 산란이 커지더라도 이에 의한 잡음이 초음파 속도와 관련 있는 공진주파수의 위치에는 영향을 미치지 않고 크기에만 영향을 미치기 때문에, 충격-반향 응답에 잡음의 영향이 크더라도 공진주파수를 뚜렷이 확인할 수 있는 한 초음파 속도의 객관적 결정이 가능하다.

4.3 충격-반향 초음파 속도와 잔존 압축 강도와의 관계

충격-반향 응답으로부터 구한 초음파 속도를 이용하여 잔존 압축 강도의 평가가 가능한지를 알아보기 위해 충격-반향 응답으로부터 구한 공진주파수 값을 식 (2)에 대입하여 초음파 속도를 구하였다. 식 (2)에서 β는 콘크리트 구조체의 형상과 관련된 상수이며 무한 평판으로 가정할 수 있는 경우 β=1.0이고, 이 연구에서의 실험체와 같이 정사각형 단면의 직육면체인 경우 β=0.87이다.

충격-반향 응답을 이용하여 구한 초음파 속도를 Table 3에 정리하였으며, 실험체의 내부 수열 온도에 따른 초음파 속도를 Fig. 5에 나타내었다. 우선 무가열 시험체의 경우 평균 초음파 속도가 약 4280 (m/s)로 계측 되었는데, 보통 강도 콘크리트의 초음파 속도 범위가 약 4000- 4500 (m/s)인 점을 감안하면, 공진주파수로부터 초음파 속도가 매우 타당하게 구해졌다고 판단할 수 있다. 한편, 그림에서 내부 수열 온도가 증가할수록 초음파 속도도 전반적으로 감소하는 경향이 나타나지만 수열 온도 범위에 따라서 저하되는 양상은 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 내부 수열 온도 64℃에 해당하는 가열 지속 시간 30분까지는 초음파 속도의 변화가 거의 없고, 이후 250℃까지의 구간에서는 매우 급격하게 초음파 속도가 감소하지만, 그 후에는 초음파 속도의 감소가 다소 완만한 것을 확인할 수 있다. 고온 수열 콘크리트의 이러한 초음파 속도 변화는 고온 수열에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화에 기인한다. 화해된 콘크리트의 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 화해 손상된 콘크리트의 압축 강도와 초음파 속도가 매우 강한 상관관계가 있음을 확인할 수 있으며, 이는 초음파 속도로부터 콘크리트의 잔존 압축 강도를 간접적으로 평가하는 것이 가능하다는 것을 시사한다.

한편, 초음파 속도와 화해된 콘크리트의 강도가 강한 상관관계를 나타내고 있기는 하나 이러한 상관관계가 선형적이지는 않은 것이 Fig. 6에서 확인된다. 초음파 속도와 화해된 콘크리트의 압축 강도 사이에 이러한 비선형성은 화해가 콘크리트의 강도에 미치는 영향과 초음파 속도에 미치는 영향이 다르기 때문으로 판단된다. Table 4에는 수열 온도 범위에 따른 콘크리트 압축 강도의 평균 잔존율과 초음파 속도의 평균 잔존율을 나타내었다. 내부 수열 온도 상승이 약 100℃에 이르기까지는 압축 강도에 비해 초음파 속도의 저하 정도가 더 크지만, 이후에는 초음파 속도에 비해 압축 강도의 저하 정도가 상대적으로 더 큰 경향이 나타남을 알 수 있다. 특히 초기 100℃에 이르기까지 저하 정도에서 매우 큰 차이

Table 3 Ultrasonic Wave Velocity Measurement Results

Specimen No.	Heating Time (Maximum Temperature)	Measured Velocity (m/s)	Average Velocity (m/s)
N-1	No Heating (at room temp. : 25℃)	4180.7	4279.0
N-2		4301.0	
N-3		4355.3	
H30-1	30 min (64℃)	4179.1	4269.0
H30-2		4293.9	
H30-3		4334.1	
H60-1	60 min (104℃)	3206.3	3104.9
H60-2		3070.5	
H60-3		3037.8	
H120-1	120 min (249℃)	2013.7	1914.6
H120-2		1915.2	
H120-3		1815.1	
H180-1	180 min (903℃)	1433.4	1418.5
H180-2		1481.7	
H180-3		1340.2	

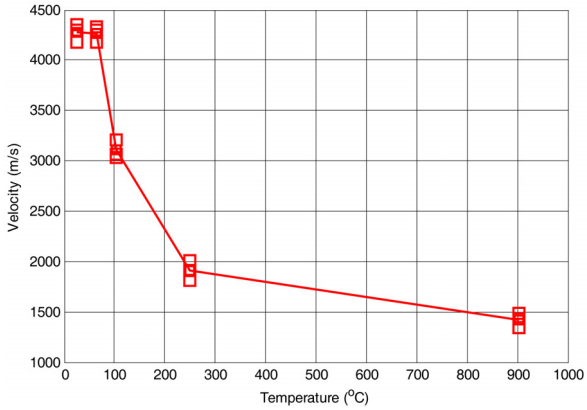


Fig. 5 Relationship between Ultrasonic Wave Velocity and Temperature

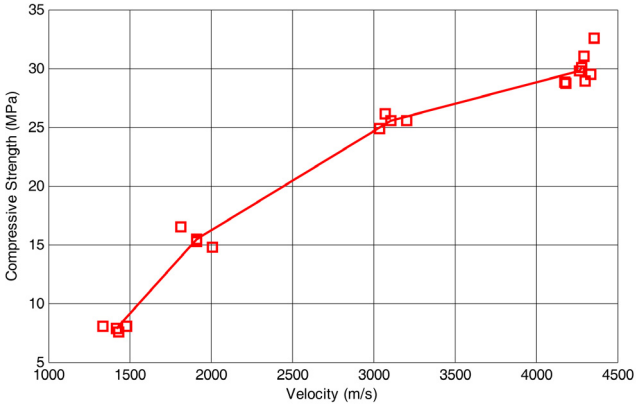


Fig. 6 Relationship between Compressive Strength and Ultrasonic Wave Velocity of Fire-damaged Concrete

Table 4 Average Residual Ratios of Compressive Strength and Ultrasonic Wave Velocity

Heating Time (Maximum Temperature)	Strength Residual Ratio (%)	Velocity Residual Ratio (%)
No Heating (at room temp.: 25℃)	100	100
30 min (64℃)	94.97	99.77
60 min (104℃)	84.83	72.56
120 min (249℃)	51.56	44.74
180 min (903℃)	26.15	33.15

가 나타나는데, 이는 콘크리트 내부 공극수의 거동이 초음파 속도와 역학적 특성에 미치는 영향이 다르기 때문으로 판단된다. 이러한 판단의 근거는 일반적으로 콘크리트는 내부 공극 구조가 동일하더라도 공극 내 수분의 포화상태에 따라 역학적 특성과 초음파 속도에 차이가 있으며, 또한 수분 상태 변화가 역학적 특성이나 초음파 속도에 미치는 영향도 다른 것으로 알려져 있기 때문이다. 그러나, 이러한 판단은 일반적인 사실에서 유추한 것이므로 보다 실제적인 규명이 필요하다.

5. 결 론

이 연구에서는 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가를 위한 초음파 속도 계측에 있어서 충격-반향 기법의 적용 가능성을 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 콘크리트의 수열 온도가 높을수록 콘크리트 내부 구조 변화에 따른 초음파 산란이 많이 발생하여 충격-반향 응답에 잡음 성분이 많이 포함되지만, 공진 주파수에 해당하는 주파수 성분은 내부 수열 온도가 903℃에 이르더라도 뚜렷이 관찰할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 가열에 따른 콘크리트 내부 구조 변화로 인해 초음파 산란이 증가하지만 이러한 초음파 산란은 충격-반향 응답 상에서 각 주파수 성분의 상대적 크기에만 영향을 미치고 공진주파수의 위치에는 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.

(3) 화해된 콘크리트의 충격-반향 응답으로부터 구한 초음파 속도는 압축 강도와 매우 높은 상관관계를 가지고 있으며, 화해된 콘크리트의 잔존 압축 강도 평가에 충격-반향 응답으로부터 구한 초음파 속도의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

(4) 화해된 콘크리트의 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계에는 비선형성이 있다는 것을 알 수 있었으며, 이는 화해가 콘크리트의 강도에 미치는 영향과 초음파 속도에 미치는 영향이 다르기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 일환으로 한국건설교통기술평가원이 관리하고 있는 초고층빌딩시공기술연구단의 지원에 의한 것입니다.

References

1. Arioz, O., “Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete”, Fire Safety Journal, Vol. 42, 2007, pp.516-522.
2. Chung, H. W., “Ultrasonic Testing of Concrete After Exposure to High Temperature”, NDT International, Vol. 18, No. 5, 1985, pp.275-278.
3. Chung, H. W. and Law, K. S., “Assessing Fire Damage of Concrete by the Ultrasonic Pulse Technique”, Cement Concrete and Aggregate, Vol. 7, 1985, pp.84-88.
4. Colombo, M. and Felicetti, R., “New NDT Techniques for the Assessment of Fire-damaged Concrete Structures”, Fire Safety Journal, Vol. 42, 2007, pp.461-472.
5. Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures, Korea Concrete Institute, 2005.
6. Harmathy, T. Z., Fire Safety Design and Concrete, Longman Scientific and Technical, London, UK, 1993.
7. Kang, B. H., “An experimental study on the influence of strength of high-heated concrete by ultrasonic testing”, Ph.D. Thesis, Hanyang Univ., Korea, 1989.
8. Kim, Y. T., Kim, T. Y. and Oh, C. H., “An experimental study on the estimation of strength for high-heated concrete by means of non-destructive testing method”, Proceedings of the AIK Conference, Vol. 10, No. 1, 1990, pp.357-361.
9. Malhotra, V. M. and Carino, N. J., Handbook of Non destructive Testing of Concrete, CRC Press, PA, USA, 2004.
10. Martin, J. and Forde, M. C., “Influence of Concrete Properties on Impulse Hammer Spectrum and Compression Wave Velocity”, Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 4, 1995, pp245-255.
11. Popovics, J., Song, W., Achenbach, J., Lee, J. and Andre, R., “One-Sided Stress Wave Velocity Measurement in Concrete”, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 12, 1998, pp.1346-1353.
12. Popovics, S., Strength and Related Properties of Concrete, John Wiley & Sons, USA, 2000.
13. Sansalone, M. J. and Streett, W. B., Impact-Echo : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, NY, USA, 1997.
14. Suaris, W. and Fernando, V., “Detection of Crack Growth in Concrete from Ultrasonic Intensity Measurements”, Materials and Structures, Vol. 20, 1987, pp.214-220.
15. Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C. and Liu, J., “Evaluating Residual Compressive Strength of Concrete at Elevated Temperatures Using Ultrasonic Pulse Velocity”, Fire Safety Journal, Vol. 44, 2009, pp.121-130.
16. Yim, H. J., Kim, J. H., Park, S. J. and Kwak, H. G., “Characterization of Thermally Damaged Concrete Using a Nonlinear Ultrasonic Method”, Cement and Concrete Research, Vol. 42, No. 11, 2012, pp.1438-1446.

Received : 03/28/2013
Revised : 06/18/2013
Accepted : 06/24/2013

요 지

이 연구에서는 화해된 콘크리트의 잔존 강도 평가에 있어서 충격-반향 기법의 적용성을 알아보고자 하였다. 화해를 모사하기 위해 콘크리트 실험체에 대한 표준 화재 온도 가열 시험을 실시하고, 화해된 콘크리트 실험체에 대해 충격-반향 응답 실험 및 압축 강도 실험을 실시하였다. 화해된 콘크리트의 충격-반향 응답 특성과 압축 강도의 잔존 특성을 분석하였으며, 또한 충격-반향 응답으로부터 구한 초음파 속도와 잔존 압축 강도와의 상관관계를 분석하였다. 연구 결과 화해된 콘크리트의 초음파 속도를 충격-반향 기법으로 신뢰성 있게 계측할 수 있으며, 또한 잔존 강도 평가에 충격-반향 기법을 유효하게 적용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 충격−반향 기법, 화해 콘크리트, 잔존 강도 평가, 초음파 속도