

확산초음파의 콘크리트 함수율에 대한 의존성

안은종¹, 신명수^{2*}

Effects of Moisture Content in Concrete on Diffuse Ultrasound

Eunjong Ahn¹, Myoungsu Shin^{2*}

Abstract: This study investigates the effects of moisture content on diffuse ultrasound to be applied for the evaluation of micro-structural damage in concrete subjected to various environmental conditions. We monitored diffuse wave parameters for concrete samples in process of water saturation for 5 days. Dried samples were immersed in a water bath, and the change of moisture content in concrete were estimated by measuring the change of mass. For the diffuse wave analysis, a frequency range of 500 kHz, which represents a scattering regime of ultrasound in concrete, was selected. The test results reveal that the ultrasonic diffusivity slightly changed, and the ultrasonic dissipation significantly increased by approximately 120% in the process of water saturation. Therefore, the moisture content in concrete should be considered for the evaluation of micro-structural damage using diffuse wave techniques.

Keywords: Concrete, Diffuse ultrasound, Moisture content

1. 서 론

콘크리트 구조물 내부에 존재하는 균열은 재료의 내구성능 저하를 발생시키고, 궁극적으로 내구연한 단축 등 사용성 문제까지 이어진다. 콘크리트 구조물 내부의 균열 등의 결함을 진단하기 위하여, P파 속도, 위상 속도, 표면파 투과 에너지 등의 일관된 위상을 갖는 “Coherent 파동” 기반의 초음파 기법 등이 많이 연구되어 왔다 (Kee, 2015). “Coherent 파동” 기반의 기법은 콘크리트 내부에 존재하는 골재에서 발생하는 산란으로부터 영향을 최소화하기 위하여 파장이 상대적으로 긴 저주파 (20 ~ 100 kHz) 대역대를 주로 사용하고 있다 (ASTM C597, 2016). 저주파 대역대를 사용하는 “Coherent 파동” 기반의 기법은 휨 균열 등 상대적으로 손상이 심한 균열 평가에는 높은 민감도를 나타내지만, 파장보다 작은 크기의 미세 균열 평가에는 어려움이 있다 (Ahn et al., 2017).

반면에, 상대적으로 파장이 짧은 고주파 (200 kHz ~ MHz) 대역대를 활용하여 위상의 차이가 있는 “Incoherent 파동” 기반의 초음파 기법은 파장과 유사한 크기의 미세 균열 손상 및

변화에 대해 민감한 장점이 있다. 최근 일부 연구자들은 콘크리트 미세구조 평가에 있어서 더 높은 민감도를 얻고자, “Incoherent 파동” 기반의 초음파 기법인 확산초음파 및 코다파 간섭기법 등을 활용하여 콘크리트 균열 손상 평가 연구를 수행하였다 (Deroo et al., 2010; Ahn et al., 2018; Ahn et al., 2019).

미세 균열 손상 평가에 강점이 있는 확산초음파 기법은 주로 실험 외적인 요인으로 인한 변화를 최대한 방지하기 위하여, 실험실 환경에서 주로 수행되고 있다. 기존의 초음파 및 비파괴 시험 기법들은 콘크리트 물성뿐만 아니라 외부적인 환경 요소(예: 수분 함유량)들에도 영향을 받는다고 보고되고 있다 (Lee et al., 1999; Ohdaira and Masuzawa, 2000; Eiras et al., 2014). 기존의 “Coherent 파동” 기반의 기법들에서는 콘크리트 내부 수분 함유량 증가에 따라서 속도가 증가함을 확인하였으나, “Incoherent 파동” 기반의 확산초음파 파라미터에 미치는 영향에 대한 분석이 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 외부 환경적 요소들 중 하나인 콘크리트의 수분함유량이 확산초음파 파라미터인 초음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

¹정회원, 울산과학기술원 도시환경공학부 박사과정

²정회원, 울산과학기술원 도시환경공학부 부교수

*Corresponding author: msshin@unist.ac.kr

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), 50 UNIST-gil, Ulsan 44919, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 확산초음파 이론

콘크리트는 굵은골재, 잔골재 및 이를 결합하는 시멘트 페이스트 뿐만 아니라 작은 크기의 균열과 공극 등으로 구성되어 있다. 이러한 비균질적인 특성으로 인하여, 콘크리트 내부에서 거동하는 초음파는 투과, 반사, 회절, 산란, 감쇄 등의 복합적인 영향을 받는다. 콘크리트 내에서 발생하는 초음파의 산란의 양은 비균질성(예: 공극, 균열, 골재)의 크기, 평균자유경로(초음파가 연속적인 충돌로 이동하는 평균 거리), 초음파의 파장 사이의 관계에 의하여 결정된다. 따라서, 초음파의 산란과 감쇄 현상은 주파수가 증가할수록 커지며, 만약 주파수가 충분히 크다면 초음파의 “Coherent 파동” 부분은 그림 1과 같이 “Incoherent 파동”인 확산초음파로 변화한다.

Planès and Larose는 콘크리트에서 사용하는 초음파의 주파수 대역대를 모드 분석 영역 (20 kHz 이하), 단순 산란 영역 (20 ~ 150 kHz), 다중 산란 영역 (150 kHz ~ 1 MHz), 감쇄 영역 (1 MHz 이상)과 같이 4개로 구분하였다 (Planès and Larose, 2013). 다중 산란 영역에서 초음파 파장이 평균자유경로보다 훨씬 작을 경우, 전체 초음파장은 다중 산란된 “Incoherent 파동” 성분으로 구성 된다 (Tourin et al., 2000). 콘크리트의 경우, 균열, 공극과 골재 사이의 거리 및 이들의 크기가 150 kHz 이상의 초음파의 파장보다 크기 때문에, 경계조건(예: 실험체 형상) 등을 고려하지 않고, 확산 이론을 적용할 수 있다.

이론적으로, 초음파의 확산은 열전도 현상과 같은 메커니즘을 갖는다고 가정하며, 선행연구자들은 초음파의 확산현상을 설명하기 위해, 열 전도 현상을 보정한 식 (1)과 같은 지배 방정식을 사용하였다 (Weaver, 1998).

$$D\nabla^2 \langle E(x,y,z,t) \rangle - \frac{\partial}{\partial t} \langle E(x,y,z,t) \rangle - \sigma \langle E(x,y,z,t) \rangle = -f(x,y,z,t) \quad (1)$$

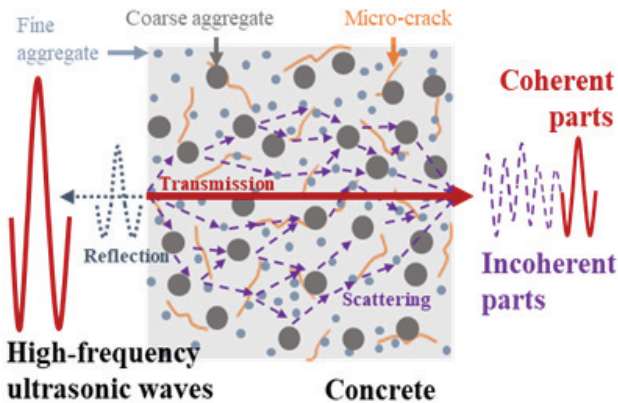


Fig. 1 Diffuse-wave propagation in concrete [Ahn et al., 2019]

여기서, D 와 σ 는 콘크리트 내에 초음파 확산계수 (m^2/s) 및 초음파 에너지 소산계수 ($1/s$), $\langle E(x,y,z,t) \rangle$ 는 앙상블 평균된 초음파 에너지 밀도, $f(x,y,z,t)$ 는 위치 $(0,0,0)$ 에서 가진한 에너지, x, y, z, t 는 3차원 공간 좌표계 및 시간이다.

3차원 무한체 내에서 식 (1)의 해는 아래 식 (2)와 같다.

$$\langle E(x,y,z,t) \rangle = \frac{E_0}{8(D\pi t)^{1.5}} e^{-\frac{d^2}{4Dt} - \sigma t} \quad (2)$$

식 (2)는 실험 결과를 토대로 초음파 확산계수(D)와 초음파 에너지 소산계수(σ)를 산정하는 회귀 분석 시 편의성을 위하여, 식 (3)과 같이 로그형태로 변환하여 사용한다.

$$\log \langle E(x,y,z,t) \rangle = C_0 - 1.5 \log(Dt) - \frac{d^2}{4Dt} - \sigma t \quad (3)$$

여기서, E_0 는 초기 초음파 에너지 밀도, C_0 는 초기 초음파 에너지 밀도 E_0 와 관련된 상수, d 는 가진 탐촉자-계측 센서 간 거리이다.

3. 실험 연구

3.1 실험 개요

본 실험에서는 식 (3)에 있는 3차원 무한체 확산방정식을 적용하기 위하여, 가진하는 초음파의 파장과 탐촉자 간 거리를 복합적으로 고려하여 길이 250 mm, 너비 250 mm, 높이 100 mm 크기로 제작하였다. 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같으며, 콘크리트 내에서 초음파의 산란을 충분히 유발 할 수 있도록 25 mm 굵은 골재를 포함하였다. 사용한 실험체의 28 일 압축강도와 탄성계수는 지름 100 mm, 높이 200 mm 원주형 공시체로 측정하였으며, 각각 40.1 MPa와 30.9 GPa로 나타났다. 콘크리트 실험체는 3년여간 실험실 환경에서 양생하여 완전 건조된 상태로 준비하였다. 완전 건조된 실험체를 5 일간 수증 침지시키면서, 확산 초음파 실험 시 콘크리트 실험체 무게 측정을 통하여 콘크리트 내부의 수분 함유량 변화 평가하였다.

Table 1 Mix proportions of the test specimen

Mix proportions (kg/m^3)				
Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super-plasticizer
374	16	935	935	1.5
(1)	(0.45)	(2.5)	(2.5)	(0.004)

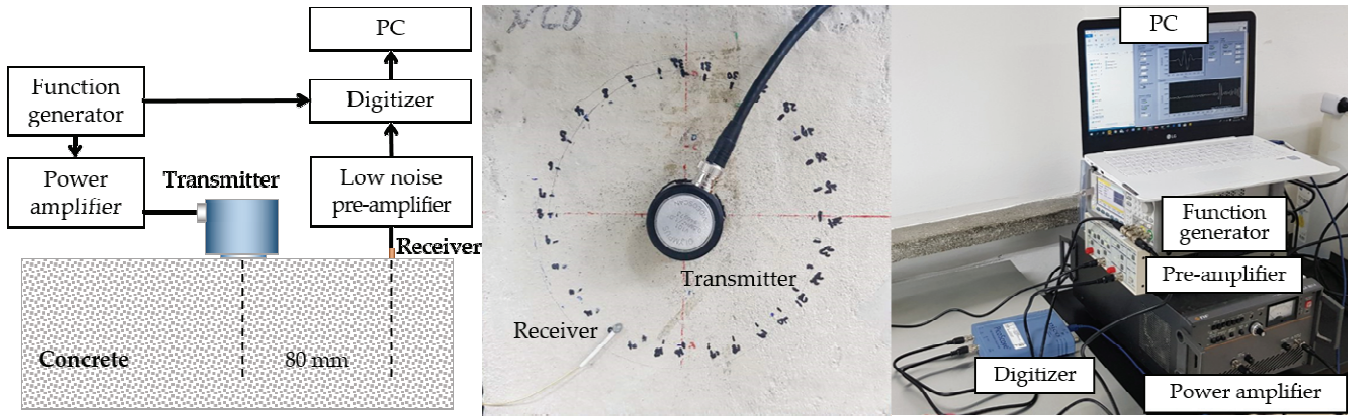


Fig. 2 Diffuse-wave test setup

3.2 확산초음파 실험

확산초음파 실험 전경은 Fig. 2와 같다. 임의파형발생기 (Keysight Technologies, 33512B)에서 1.5 V 크기의 500 kHz 톤버스트 신호를 생성하였으며, 파워 앰프(NF, HSA-4014)에서 100배 증폭시켜, 500 kHz 중심 주파수의 초음파 탐촉자 (Olympus, V101-RB)를 통해 가진하였다. 확산초음파 신호 계측을 위하여, 4 mm 지름과 200 ~ 750 kHz 주파수 대역대를 갖는 초소형 AE 센서(Mistras, PICO)를 가진원으로부터 80 mm 떨어진 서로 다른 위치에 32 곳에 부착하였다. 계측된 신호는 저소음 전치증폭기(Stanford Research System, SR560)에서 100 배 증폭하였다. 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시키기 위하여, 16 bits 수직분해능을 갖는 디지털라이저 (PICO Technology, Picoscope 4262)를 사용하였으며, 이때 적절한 시간 분해능을 얻기 위하여, 샘플링레이트는 10 MS/s로 설정하여 신호를 수집하였다. 마지막으로, 디지털라이저에서 변환된 모든 신호는 신호 대비 잡음비를 개선하기 위하여, Fig. 3과 같이 100회 반복 평균하여 LABVIEW 프로그램을 통해 저장하였고, 모든 데이터는 MATLAB 프로그램을 사용하여 분석하였다.

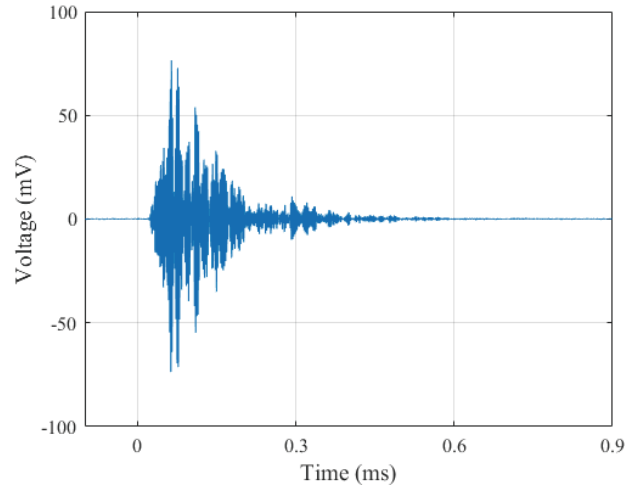


Fig. 3 Diffuse-wave time signal after averaging 100 repetitions

3.3 신호 처리

선행연구결과에서 제시한 Fig. 4의 순서에 따라 신호처리를 수행하였다 (Ahn et al., 2019). 시간-주파수 분석을 통하여, 콘크리트 내에서 확산초음파 파라미터를 산정하였다. 먼저 시간 평균화된 신호는 고속 푸리에 변환(FFT)를 통하여 주파수 대역대로 변환하였다. 그 후, 주파수 영역의 코사인 벨 모양의 윈도우를 주파수 대역대 신호에 곱하여 특정 주파수 성분(예: 400 ~ 600 kHz)을 분리시켰다. 이 단계에서, 윈도우 Δf (밴드 패스 필터의 길이)는 200 kHz, Δt (필터링 후 파형의 시간 분해능; $1/\Delta f$) 은 $5 \mu s$ 로 설정하였다.

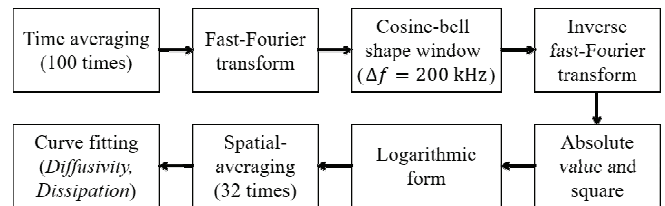
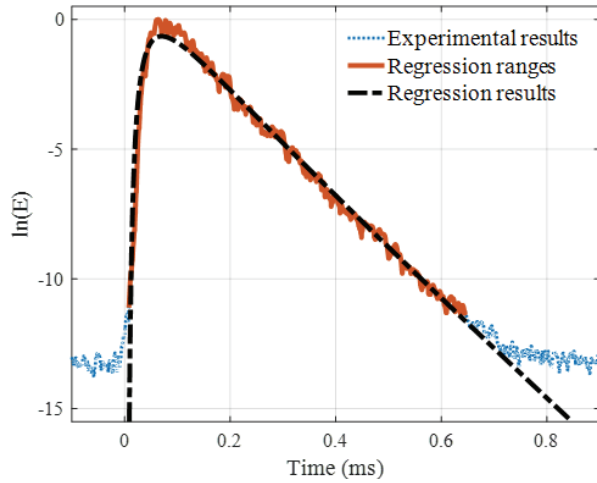


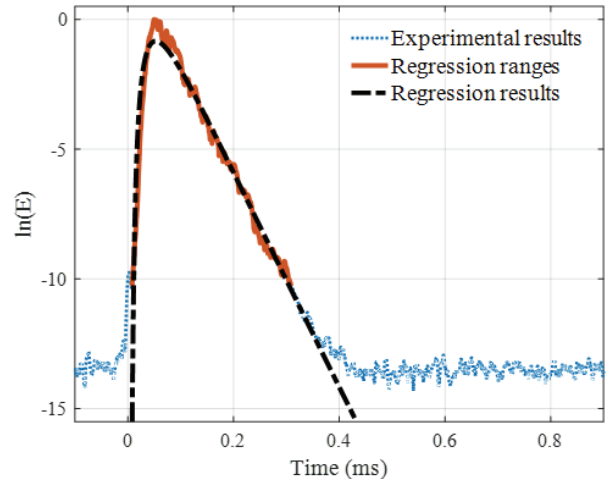
Fig. 4 Flow chart of diffuse-wave data processing

주파수 대역대에서 필터링 된 신호는 역 고속 푸리에 변환을 통하여 시간 대역대 신호로 변환하여, 절대값을 취한 후 제곱하였다. 신호 처리 결과 측정된 값은 시간에 따른 초음파 에너지 밀도이며, 이론식과 회귀분석을 위하여 로그 형태로 취하였다. 마지막으로, 32곳의 위치에서 도출한 로그 형태의 초음파 에너지 밀도를 공간 평균화 하였다.

확산초음파 파라미터로 일반적으로 사용되는 식 (3)의 초음파 확산계수와 에너지 소산계수가 콘크리트 수분 함유량 변화에 따른 영향을 분석하였다. 초음파 확산계수와 에너지



(a) fully dried conditions



(b) fully saturated conditions

Fig. 5 Ultrasonic energy density versus time for fully dried and saturated specimen

소산 계수는 그림 5와 같이 초음파 에너지 밀도와 식 (3)의 이론식 사이의 회귀 분석을 통해 3개의 변수 C_0 , D , σ 를 산정하였다. 회귀 분석은 MATLAB 프로그램에서 제공하는 “fit” 함수의 비선형 최소 자승 오차법을 활용하여 수행하였다.

4. 실험 결과

확산초음파 파라미터는 콘크리트 재료 특성뿐만 아니라, 분석 주파수, 실험환경에 따라 변화하는 특성을 갖고 있어 (Ahn et al., 2019), 본 연구에서는 콘크리트 수분 함유량을 제외한 다른 영향인자를 최소화하며 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 콘크리트 수분 함유량 차이에 따른 500 kHz 대역대의 초음파 에너지 밀도 데이터를 로그 스케일로 나타냈으며, 파란 점선은 실험 측정 결과이며, 빨간 굵은 실선은 회귀 분석에 사용한 데이터 영역이며, 검은 쇄선은 실험 데이터와 식 (3) 사이의 회귀분석 결과다.

Fig. 5의 초음파 에너지의 상승 구간(약 0.1 ms 이전)은 식 (3)의 초음파 확산계수 산정에 영향을 주고, 하강 구간(0.1 ~ 0.4 ms)은 식 (3)의 초음파 에너지 소산계수 산정에 영향을 끼친다. Fig. 5(a)의 완전 건조된 실험체에서는 0.7 ~ 0.8 ms 이후

에 신호의 크기가 잡음 수준으로 변하는 것을 확인 할 수 있는 반면에, Fig. 5(b)의 완전 포화된 실험체에서는 0.3 ~ 0.4 ms 사이에서 신호의 크기가 잡음 수준으로 변하는 것을 확인 할 수 있었다. 초음파 에너지의 소산 시기와 기울기는 콘크리트 수분 함유량의 차이에 따른 것으로 사료된다.

Table 2는 콘크리트 실험체의 수분 함유량 변화를 나타내었으며, 약 5일간 수중에서 지속적인 수분 공급을 받아 무게가 약 2.5% 까지 증가함을 확인 할 수 있었으며, 이는 기존 문헌에서 콘크리트 수분 변화량과 유사한 값을 나타내었다 (Lee et al., 1999). 콘크리트 수분 함유량은 초기 9시간 침지 후에 가장 급격하게 증가하였으며, 이후 나머지 4일 동안 완만한 증가폭을 나타내었다.

Table 3은 콘크리트 수분 함유량 변화에 따른 확산초음파 파라미터 변화를 나타내었으며, 약 5일간 수중에서 지속적인 수분 공급을 받아 완전 포화상태에서 측정한 초음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수는 완전 건조 상태 대비 최대 약 5%와 120%가 증가함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 6(a)는 콘크리트 포화 상태 변화에 따른 초음파 확산계수 변화를 나타낸 그래프이며, Fig. 6(b)는 콘크리트 포화 상태 변화에 따른 초음파 에너지 소산계수 변화를 나타낸 그래프다. 기존 선행 연구 결과에 따르면, 확산초음파 파라미터인 초

Table 2 Mass increases in process of saturations

	Immersed hours						
	0	9	21	42	67	90	112
Mass (kg)	14.72	14.85	14.90	14.96	15.02	15.05	15.08
Moisture increase (%)	-	0.90	1.26	1.68	2.06	2.28	2.45

Table 3 Change of diffuse wave parameters in process of saturation

	Immersed hours						
	0	9	21	42	67	90	112
Diffusivity (m^2/s)	8.32	8.41	8.41	8.62	8.62	8.72	8.62
Dissipation (1/ms)	17.7	22.8	24.8	28.1	32.1	35.4	38.4

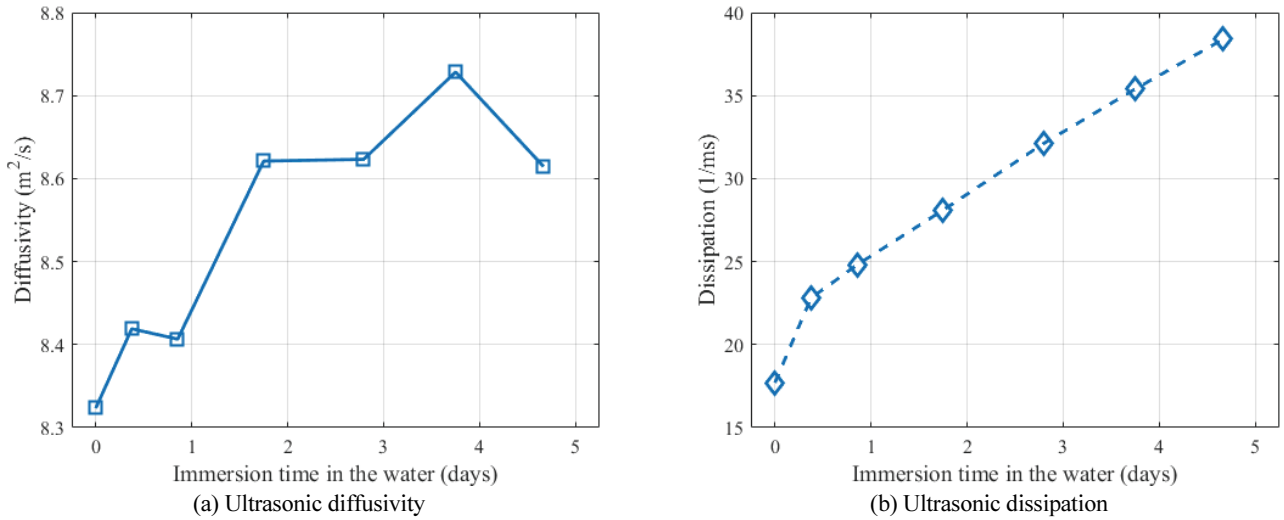


Fig. 6 Change of diffuse wave parameters in process of saturation

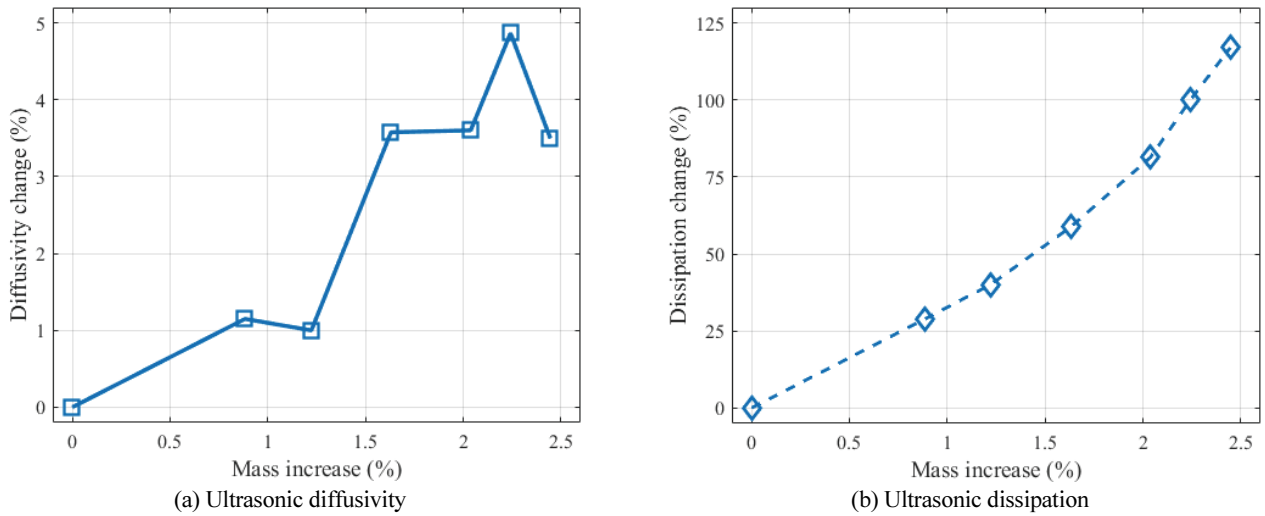


Fig. 7 Correlation between diffuse wave parameters and moisture content

음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수의 변동 계수는 각각 약 10%와 약 5% 내외로 나타났다 (Ahn et al., 2019). 이를 고려하면, 콘크리트 포화도에 따라 초음파 확산계수는 증가하는 경향을 보이지만, 계측의 변동성 이내에 있는 것을 파악할 수 있었지만, 초음파 에너지 소산계수의 변화량은 실험의 오차 범위 내에 있다고 볼 수 없었다. 또한, 기존 선행 연구 결과에 따르면, 콘크리트 미세 균열 손상에 따라 초음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수는 약 30% 변화하는 것으로 나타났다 (Ahn et al., 2019). 이를 고려하면, 초음파 에너지 소산계수는 콘크리트 미세 균열 손상보다 내부의 수분 함유량 변화에 더 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 7(a)는 콘크리트 수분 함유량 증가와 초음파 확산계수 변화량 사이의 상관관계를 나타낸 그래프이며, Fig. 7(b)는 콘

크리트 수분 함유량 증가와 초음파 에너지 소산계수 사이의 상관관계를 나타낸 그래프다. 초음파 에너지 소산계수는 콘크리트 수분 함유량 증가율에 대해 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

확산초음파 파라미터인 초음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수는 콘크리트 수분 함유량 사이의 상관관계를 확인하였으며, 추후 다양한 공극률을 가진 콘크리트에 대해 실험을 수행하여, 확산초음파 파라미터와 수분 함유량 사이의 정량적인 상관관계 도출을 통한 모델 개발과 검증이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 수분 함유량이 확산초음파 파라미터에 끼치는 영향을 실험적으로 분석하기 위하여, 콘크리트 수분 함유량을 점차 증가시켜가며, 확산초음파 시험을 수행하였다. 본 연구의 결론은 아래와 같다.

1. 콘크리트 수분 함유량 증가에 따라 실험체의 무게는 약 2.5% 가량 증가하였으며, 콘크리트 포화상태 변화에 따라 초음파 확산계수는 약 5%, 초음파 에너지 소산계수는 약 120% 변화한 것을 확인할 수 있었다.
2. 추후 확산초음파 기법을 활용한 비파괴 평가와 콘크리트 재료 특성 평가의 신뢰성 개선을 위하여, 다양한 종류의 콘크리트 실험체에 대한 확산초음파 파라미터와 콘크리트 함수율 사이의 상관관계 모델 개발 및 검증이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원 (19SCIP-B103706-05)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kee, S. (2015), Evaluating the depth of a surface-opening crack in concrete slabs using surface wave measurements. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(3), 104-112.
2. ASTM C597 (2016), Standard test method for pulse velocity

- through concrete, *American Society for Testing and Materials International*: West Conshohocken, PA, USA.
3. Ahn, E., Kim, H., Sim, S.-H., Shin, S. W. and Shin, M. (2017), Principles and applications of ultrasonic-based nondestructive methods for self-healing in cementitious materials. *Materials*, 10(3), 278.
 4. Deroo, F., Kim, J. Y., Qu, J., Sabra, K., and Jacobs, L. J. (2010), Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3315-3318.
 5. Ahn, E., Gwon, S., Kim, H., Kim, C., Sim, S.-H. and Shin, M. (2018), Applicability of diffuse ultrasound to evaluation of water permeability and chloride ion penetrability of cracked concrete. *Sensors*, 18(12), 4156.
 6. Ahn, E., Shin, M., Popovics, J. S. and Weaver, R. L. (2019), Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete. *Cement and Concrete Research*, 124, 105862.
 7. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, J. S. and Kim, D. S. (1999), Influence of moisture content on longitudinal wave velocity in concrete. *Journal of Korean Society of Nondestructive Testing*, 19(4), 259-269.
 8. Ohdaira, E. and Masuzawa N. (2000) Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE. *Ultrasonics*, 38(1-8), 546-552.
 9. Eiras, J. N., Popovics, J. S., Borrachero, M. V., Monzó, J. and Payá, J. (2015) The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods. *Construction and Building Materials*, 94(30), 565-571.
 10. Planès, T. and Larose, E. (2013), A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. *Cement and Concrete Research*, 53, 248-255.
 11. Tourin, A., Fink, M. and Derode, A. (2000), Multiple scattering of sound, *Waves random media*, 10(4), R31-R60.
 12. Weaver, R. L. (1998), Ultrasonics in an aluminum foam, *Ultrasonics*, 36 (1-5), 435-442.

Received : 01/17/2020

Revised : 01/24/2020

Accepted : 01/30/2020

요 지 : 본 연구의 목적은 콘크리트 재료 및 구조물의 균열 특성 평가에 활용되고 있는 확산초음파 기법의 적용 가능성을 검토하는데 있다. 이를 위한 첫 단계로 외부 환경에 따라 변화하는 콘크리트의 수분 함유량 변화를 묘사하여, 확산초음파 파라미터와 콘크리트 수분 함유량 사이의 상관관계 분석을 수행하였다. 실험실 환경에서 완전 건조된 실험체를 수중에서 포화시켜가며 콘크리트 함수율의 차이를 묘사하였으며, 콘크리트 내부에서 초음파의 산란 현상이 충분히 발생하는 500 kHz 주파수 대역대의 신호를 가진 실험체를 분석하여 확산초음파 파라미터인 초음파 확산계수와 초음파 에너지 소산계수를 산정하였다. 콘크리트의 수분 함유량은 확산초음파 실험 시 실험체의 무게 변화를 통해 추정하였으며, 수분 함유량 증가에 따라 실험체에서 무게가 약 2.5% 가량 증가한 것으로 나타났다. 콘크리트 실험체의 포화정도에 따라 초음파 확산계수는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 변화율은 확산초음파 기법의 측정 오차 범위 내에 있었다. 반면에, 초음파 에너지 소산계수는 완전 포화된 콘크리트에서 완전 건조된 콘크리트 대비 약 120% 증가하여, 수분함유량에 대해 민감한 것으로 나타났다. 따라서, 추후 확산초음파 기법을 활용하여 콘크리트 재료 및 구조물의 균열 특성 평가 시 함수율에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 콘크리트, 확산초음파, 함수량