

Research Paper

콘크리트의 초기동해 진단을 위한 초음파 속도법의 적용 가능성 평가

Assessment of Ultrasonic Pulse Velocity Method for Early Detection of Frost Damage in Concrete

문소희¹ · 이태규² · 최희섭³ · 최형길^{4*}

Moon, Sohee¹ · Lee, Taegyul² · Choi, Heesup³ · Choi, Hyeonggil^{4*}

¹Master's Course, School of Architectural, Civil, Environmental, and Energy Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

²Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, Hokkaido, 090-8507, Japan

⁴Professor, School of Architecture, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

*Corresponding author

Choi, Hyeonggil
Tel : 82-53-950-5596
E-mail : hgchoi@knu.ac.kr

ABSTRACT

This research delves into the evaluation of the suitability of ultrasonic pulse velocity as a diagnostic tool for early detection of frost damage in concrete. The investigation involves the measurement of compressive strength and ultrasonic pulse velocity concerning the depth of freezing for individual mortar specimens, followed by an analysis of their microstructure and their interrelation. The findings indicate a consistent decrease in both compressive strength and ultrasonic pulse velocity with increasing freezing depth. Furthermore, a correlation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity concerning the depth of early frost damage is established. Consequently, the study asserts the potential of utilizing the ultrasonic pulse velocity method for early detection of frost damage in concrete, with prospects for quantifying the depth of damage through further research endeavors.

Keywords : cold weather concrete, early frost damage, non-destructive test, ultrasonic pulse velocity method

Received : January 8, 2024
Revised : February 5, 2024
Accepted : February 7, 2024

1. 서론

한중콘크리트란 콘크리트를 부어넣은 후의 양생기간에 콘크리트가 동결할 염려가 있는 경우에 시공되는 콘크리트로 정의되고 있다. 저온 환경하에서 특별한 조치 없이 콘크리트를 타설하게 되면 낮은 온도로 인해 콘크리트는 초기에 동결되어 초기동해를 입게 되고 경화 지연으로 강도 발현이 늦어지며, 강도 및 내구성이 저하되는 등의 문제점이 발생하게 된다. 즉, 초기동해란 콘크리트를 부어 넣은 후부터 경화의 초기 단계에 있어서 동결 또는 수회의 동결융해작용 반복에 따라 강도 저하, 파손, 균열을 일으키는 피해로 정의되고 있다. 콘크리트가 초기동해를 받으면 이후에 적절한 양생을 한다고 하더라도 충분한 강도 발현이 이루어지지 않으며, 콘크리트의 성능이 저하된다[1].

한중콘크리트 공사에서는 철저한 양생관리를 실시하지 않을 경우 초기동해 피해가 발생하게 된다. 실제 시공현장에 있어서 콘크리트의 초기동해를 판단하는 가장 일반적인 방법은 시공 현장이나 콘크리트의 양생 온도를 확인하거나 육안검사를 통해 초기동해 발생 여부를 판단하는데, 또 다른 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)를 이용한 반발 경도법을 통해 콘크리트의 표층 강도를 추정하여 콘크리트의 초기동해 피해 깊이를 판단하기도 한다[2].



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하지만 현재로서는 콘크리트의 초기동해 깊이를 정량적으로 판단하기에는 어려움이 있어 그 판정 방법을 모색하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그중 투기계수 측정을 통해 초기동해를 입은 구조물에 대하여 그 피해 깊이를 원래 위치에서 비파괴적으로 판정하는 방법을 제안하였고 이를 통한 기준을 정립하여 정량적인 초기동해 판정 방법을 제안한 바 있다[3]. 또 다른 연구에서는 초기동해 피해를 입은 모의 슬래브 부재에서 코어를 채취한 후 물에 침수시켜 실내에서 건조하였고, 이후 명도값 45 이하가 되는 짙은색과 밝은색으로 구별하여 짙은 색부분을 측정하여 초기동해 깊이를 판단하는 방법을 제안한 바 있다[4]. 이처럼 초기동해 피해 깊이를 판정하는 방법에 관한 연구는 다양하게 진행되고 있지만 코어를 채취하는 것과 같은 파괴시험이 대부분이며 초음파 속도법(Ultrasonic pulse velocity method)과 같은 비파괴시험을 통한 정량적인 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다.

초음파 속도법이란 매질 내에 관통시킨 P파의 속도를 확인하는 실험으로, 콘크리트에 P파를 관통시켜 확인한 속도를 통해 콘크리트의 압축강도와의 관계를 추정하는 것이 가능하다. 기존 연구에서는 콘크리트의 초음파 펄스 속도를 측정하여 압축강도 추정식을 제안하거나 콘크리트의 건전성을 평가하는 기준을 제안한 바 있으며[5-9], 그중 고온에 노출된 콘크리트의 압축강도를 추정하거나 화재 조건에 노출된 콘크리트의 초음파 펄스 속도와 기계적 성질의 관계를 조사하여 콘크리트의 건전성을 평가한 바 있다[10-13].

이처럼 초음파 속도법을 통해 내구성이 저하된 콘크리트의 건전성을 비파괴적인 방법으로 평가하는 것이 가능하다고 판단되어, 본 연구에서는 초음파 속도법을 콘크리트의 초기동해 발생 여부와 그 피해 깊이를 정량적으로 진단하는 방법으로서의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험 계획을 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 KS L ISO 679에 규정된 ISO 표준사를 사용하였다. 모르타르 시험을 위해 $\varnothing 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 의 원주형 공시체를 통해 실험을 진행하였다. W/C는 0.5로 설정하여 보통강도 조건에서 실험을 진행하였고, C:S는 1:3으로 설정하였다.

모르타르의 굳지 않은 성상을 평가하기 위해 모르타르의 플로우, 공기량을 측정하였다. 플로우는 KS L 5105에 의거하여 플로우 테이블을 15초 동안 25회 타격하여 모르타르의 지름을 측정하였다. 공기량은 EN 459-2에 의거하여 모르타르 공기량 측정기를 통해 측정하여 평가하였다.

Table 1. Experimental plan

Specimen ^{a)}	Conditions of experiments				W/C	C:S	Measurement items
	Freezing depth (mm)	Curing before freezing (h)	Freezing temperature (°C)	Freezing time (h)			
Plain	Non-frozen	-	-	-			• Flow and Air content
FD-00	0						• Visual observation
FD-03	30				0.5	1:3	• Ultrasonic pulse velocity
FD-06	60	6	-10	24			• Compressive strength
FD-10	100						• Pore-size distribution
							• Cumulative pore volume
							• SEM

a) FD : Freezing Depth

실험 변수는 저온 노출 깊이를 각각 0, 30, 60, 100mm로 설정하여 동결을 입혔다. 동결 후 실온 상태로 꺼냈을 때 육안관찰을 실시한 뒤 압축강도와 초음파 펄스 속도를 측정하였으며, 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy) 촬영과 공극률(MIP, Mercury Intrusion Porosimetry)과 같은 미세구조 분석 결과를 통해 동결 깊이에 따른 초기동해 피해 정도를 파악하고자 하였다. 그 후 동일 시험체에서 측정한 압축강도와 초음파 펄스 속도와의 상관관계를 분석하여, 초음파 속도법을 콘크리트의 초기동해 판정 및 피해 깊이 진단 방법으로서의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2.2 저온 노출

동결 여부에 따른 영향을 알아보기 위해 동결을 입히지 않은 Plain 시편과 전체적으로 동결을 입힌 FD-10 시편을 준비하고, 동결 깊이에 따른 영향을 알아보기 위해 동결 깊이가 각각 0, 30, 60mm인 FD-00, 03, 06 시편을 준비하여 총 5수준으로 설정하였다. 각각의 동결 깊이를 설정하기 위해 Figure 1에 나타난 바와 같이 아이소핑크를 활용해 단열 장치를 제작하여 장치 외부로 노출된 깊이만큼 동결 피해를 입도록 설정하였으며, 시편과 장치 사이 틈새에 진공 그리스(Vacuum grease)를 도포하여 틈새 사이로 외기가 침투되지 않도록 하였다. Plain 시험체는 탈형 후 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 조건에서 재령일까지 수중양생을 실시하였으며, FD 시험체는 타설 후 6시간이 지난 뒤에 탈형하여 저온 노출을 위해 항온항습기를 이용해 -10°C 의 목표 온도에 노출하였다. 목표 온도에서 24시간 동안 동결시킨 후 재령일까지 온도 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 의 조건에서 수중양생을 실시하였다.

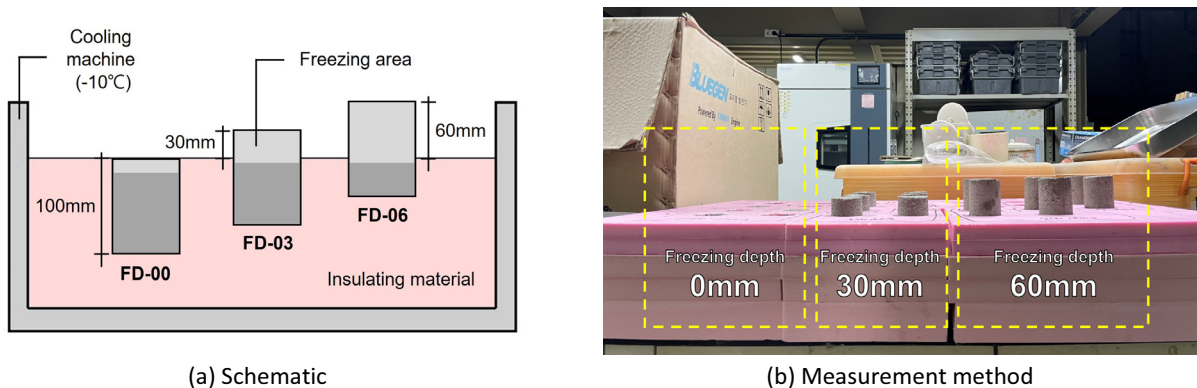


Figure 1. Low temperature exposure procedure

2.3 초음파 펄스 속도

초음파 속도법은 초음파 속도 시험 장치의 발진자(Transmitting transducer)에서부터 출발한 초음파 펄스가 콘크리트를 통과하는 거리를 거쳐 수신자(Receiving transducer)까지 입력되는 데 걸리는 시간을 측정하여 전달 속도를 구하는 것을 원리로 하고 있으며, 이러한 초음파 펄스 속도를 통해 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있다.

본 실험에서는 초음파 펄스 속도를 측정하기 위해 콘크리트 초음파 탐상기(Pundit Lab(+) proceq)를 사용하였고, 통상적으로 콘크리트 시험에서 사용하는 54kHz의 주파수를 설정하여 측정하였다. 측정 방법으로는 직접법, 반직접법, 간접법이 있으나 펄스의 전달경로가 확실하여 최대 에너지로 전달되고 정확히 측정이 가능한 직접법을 사용하여 측정하였다[14-16]. 직접법을 통해 초음파 펄스 속도를 측정하는 보통의 경우, Figure 2(a)에 나타난 바와 같이 탐촉자(Transducer)를 양손으로 잡고 시험체에 직접 접촉시켜 측정한다. 하지만 초음파 펄스 속도는 발진자와 수신자의 시험체와의 접촉 상태 및 탐촉자를 시험체에 가하는 힘에 따라 크게 달라지므로 정확한 측정을 위해 Figure 2(b)와 (c)에 나타난 바와 같이 상부로부터 2kg 하중의 압력으로 접촉시켜 같은 하중을 가할 수 있도록 하였고, 시험체와 탐촉자 사이의 밀실한 접촉을 위해 접촉면의 그라인딩

을 실시하고 표면에 진공 그리스(Vacuum grease)를 도포하였다. 그리고 정확한 결과를 도출하기 위해 같은 위치에서 1초 간격으로 20회 측정해 그 값을 평균 내어 산정하였다.

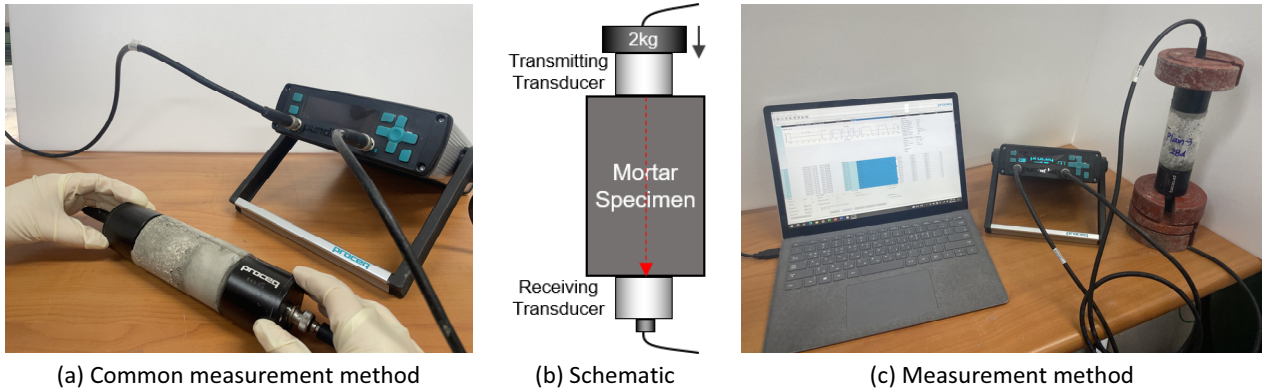


Figure 2. Methodology for ultrasonic pulse velocity test

2.4 압축강도

압축강도는 KS F 2405에 의거하여 만능재료시험기(UTM, Universal Test Machine)를 사용하여 측정하였다. 하중을 균등하게 받게 하기 위해서 공시체 연마기를 사용하여 수중 양생을 마친 공시체의 상하면을 평활하게 연마하였다. 시험체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가하였으며, 144kN/m²의 비율로 재하하였다. 압축강도는 수준별로 제작된 3개의 시험체의 평균값으로 산정하였다.

2.5 미세구조 분석(SEM, MIP)

동결 깊이에 따른 초기동해 피해 정도를 파악하기 위해 재령 3일과 28일의 압축강도를 측정한 공시체에서 2~3mm 크기의 시편을 채취하여 동결건조기를 사용해 각 재령일에 수화반응을 정지시킨 후 SEM 촬영과 MIP 분석을 실시하였다. 각각 다른 동결 깊이의 변수를 제외하고는 동등한 조건에서 실험을 진행하기 위해 공시체의 상부로부터 50mm에 위치해있는 중앙부분의 시편을 채취하여 실험을 진행하였다. SEM 촬영은 주사전자현미경(SNE-3200M)을 활용하여 채취한 시편을 금박으로 코팅하여 가속 전압 15kV, 배율 1,000배로 측정하였다. MIP 분석은 공극률 측정기(PoreMaster 33GT)를 활용하여 미리 채취한 시편에 수은을 0~33,000psi로 가압시켜 그 관입량으로부터 공극 크기 분포 및 누적 공극률을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 모르타르의 성상

본 실험에서 사용된 배합의 모르타르 플로우와 공기량 측정 결과를 나타낸다. 플로우는 170mm, 공기량은 6%로 측정되었으며, 이는 W/C=0.5 조건에서 모르타르를 배합했을 때 얻을 수 있는 일반적인 결과였으며 목표치를 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 육안관찰

Figure 3는 동결 깊이(0, 30, 60, 100mm)에 따른 동결 후 육안관찰 결과를 나타낸다. -10°C 조건에서 6시간 동안 동결을 입혀 실온으로 꺼낸 직후의 모습을 보여준다. 동결을 입힌 부분은 단열재로 감싼 부분과 비교하여 조금 더 밝은 색을 보였으며, 동결 깊이에 따른 명도 차이가 분명하게 구분된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 동결 깊이에 따른 초기동해 피해 정도를 대략적으로 파악할 수 있었다.

3.3 압축강도 및 초음파 펄스 속도

Figure 4는 동결 깊이에 따른 재령별 압축강도와 초음파 펄스 속도의 측정 결과를 나타낸다. 재령일이 3, 7, 28일로 증가할수록 압축강도와 초음파 펄스 속도는 증가하였고, 동결을 입히지 않은 Plain 시험체와 동결을 입힌 FD 시험체의 결과값이 확연하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동결을 입힌 FD 시험체가 초기동해 피해를 입어 이에 따른 강도 발현 성능이 저하되었고 재령일이 증가하여도 회복되지 않았기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 그리고 동결 깊이가 증가할수록 압축강도와 초음파 펄스 속도가 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 감소폭은 재령일이 증가할수록 크게 나타났으며, 재령 28일의 결과에서는 동결 깊이가 증가할수록 결과값이 감소하는 경향이 확연하게 나타났음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 동결 깊이가 증가할수록 초기동해 피해를 더 많이 받아 강도 발현 성능이 저하되어 압축강도가 감소하였고, 초음파 펄스 속도 역시 감소한 것으로 판단된다.

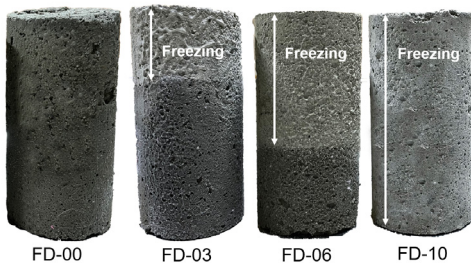


Figure 3. Visual observation

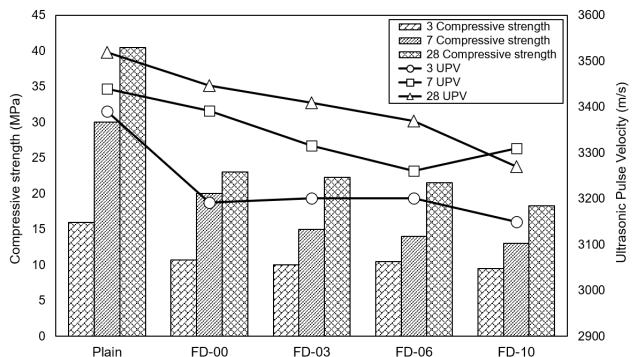


Figure 4. Compressive strength and UPV

3.4 미세구조 분석

3.4.1 주사전자현미경(SEM) 촬영

Figure 5는 재령 3일과 28일의 동결 깊이에 따른 주사전자현미경(SEM) 촬영 결과를 나타낸다. Plain 시험체에서는 ettringite, C-S-H, Ca(OH)₂ 등과 같은 수화생성물이 다량으로 생성되었으며 상대적으로 미세공극 및 미세균열이 적게 관찰되어 비교적 밀실한 구조를 가지고 있었다. 그러나 동결 깊이가 증가할수록 수화생성물의 생성량이 감소하였으며 미세공극 및 균열이 다량으로 관찰되었다. FD-03 시험체에서는 재령일이 증가하였을 때 수화가 많이 진행되어 수화생성물이 공극을 채워 조직이 밀실해진 것을 확인할 수 있었으나, FD-10 시험체에서는 재령일이 증가하여도 조직이 밀실하지 않고 여전히 미세공극과 균열이 많이 관찰되었으며 이는 골재와 시멘트 페이스트 사이 계면을 뜻하는 천이대에 발생한 균열에 의해 강도 회복이 어려웠기 때문으로 판단된다. 이처럼 초기동해로 인한 강도 발현 성능 저하가 재령일이 증가한 후에도 영향을 미쳐 이후 압축강도 및 초음파 펄스 속도에도 영향을 주었을 것으로 판단된다[17-19].

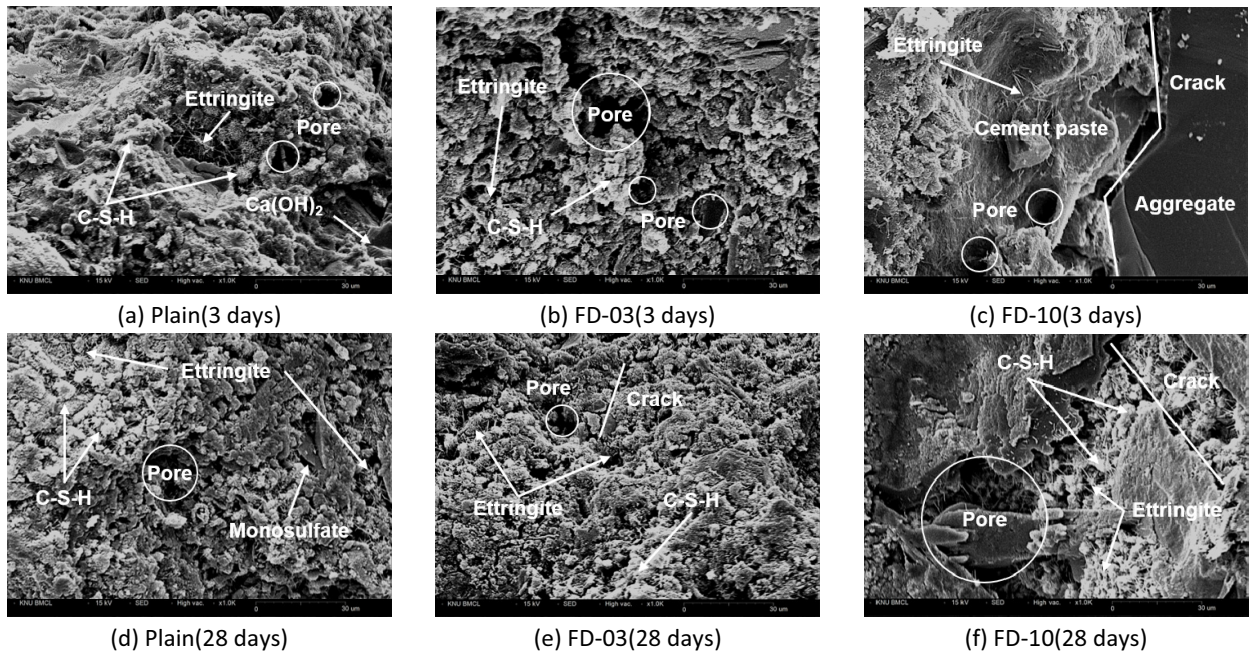


Figure 5. SEM images relative to freezing depth and curing age($\times 1,000$)

3.4.2 공극률(MIP) 분석

Figure 6는 재령 3일과 28일의 동결 깊이에 따른 공극률(MIP) 분석 결과를 나타낸다. 재령일이 증가함에 따라 수화반응에 의해 생성된 수화생성물이 공극을 채워 전체 누적 공극률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 동결 깊이가 증가할수록 전체 누적 공극률이 증가하고 공극 크기 분포 곡선이 더 큰 크기의 공극 쪽으로 이동하는 경향이 나타났으며 이러한 경향은 재령일이 증가하였을 때도 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Plain, FD-03 시험체의 누적 공극률 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 FD-03 시험체의 초기동해 피해가 중심부까지 미치지 않았기 때문에 FD-10 시험체와 비교하여 더 밀실한 구조를 가지고 있을 것으로 판단된다. 이러한 공극 특성을 통해 동결 깊이가 증가할수록 초기동해 피해를 더 많이 받아 누적 공극률이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 강도 발현에도 영향을 미쳐 시험체의 압축강도 및 초음파 펄스 속도가 감소하는 경향이 나타났다고 판단된다[20].

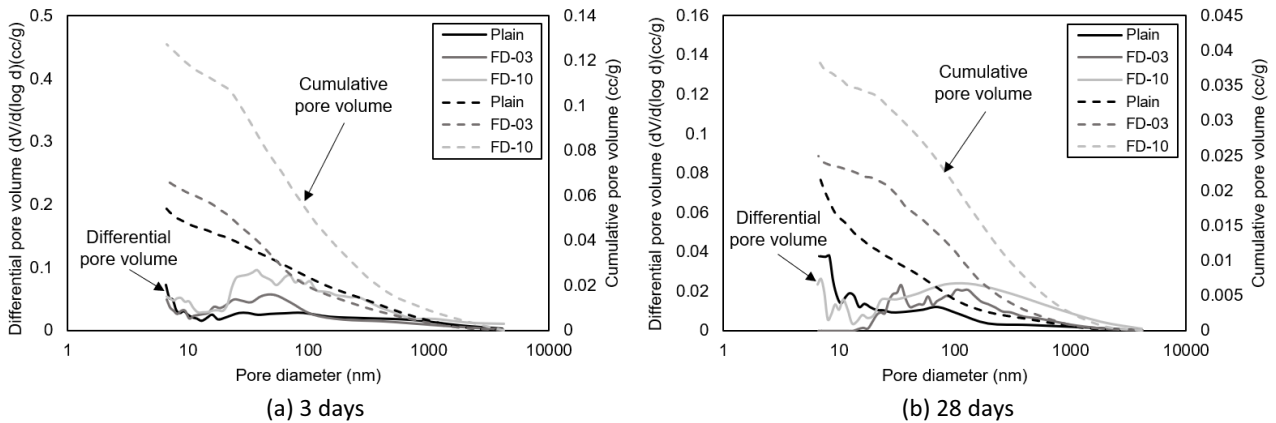


Figure 6. Distribution of pore sizes and cumulative pore volume

3.5 압축강도와 초음파 펄스 속도의 상관관계

초기동해를 입힌 모르타르 시험체의 압축강도와 초음파 펄스 속도의 상관관계를 Figure 7에 나타내었다. 회귀분석 (Regression analysis)을 통해 상관관계를 분석하였으며 결정계수(R^2)는 0.87이 얻어졌다. 결정계수(R^2)는 회귀분석에 의해서 얻어진 추정식과 실험데이터 사이의 분산된 정도를 나타내는 계수이며, 1에 가까울수록 실험 데이터가 추정식 주위에 밀집되어 추정식의 유의성이 높다고 판단한다[21]. 일반적으로 통계학에서는 결정계수(R^2)의 값이 0.75 이상이면 받아들일 수 있는 정도로 여겨지므로, 본 연구에서의 추정식은 비교적 양호한 것으로 판단되어 압축강도와 초음파 펄스 속도 사이의 상호 연관성이 존재하는 것으로 분석된다.

본 실험 결과를 토대로 얻은 추정식을 Table 2에 나타낸 기존의 초음파 펄스 속도를 통한 콘크리트의 압축강도 추정식과 비교해 보았을 때, 기존 추정식들과는 다른 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 매트릭스 내부의 초음파 전달 속도는 시멘트와 골재의 크기 및 종류, 혼화재의 사용 여부, 공극의 상태 등과 같은 구성요소와 함께 재령 및 콘크리트의 습윤 상태 등 다양한 인자의 영향을 받게 된다[22,23]. 본 연구 범위 내에서는 초기동해로 인해 동결 및 수화의 동결융해 작용으로 천이대의 파괴 등과 같은 내구성 저하 요인의 영향을 받아 기존의 다양한 추정식들과는 다른 양상을 보였다고 판단된다. 따라서 기존의 압축강도 추정식을 초기동해 피해를 입은 콘크리트에 적용하기에 어려움이 있을 것으로 판단하여, 콘크리트 시험체를 대상으로 다양한 조건에서의 추가적인 실험을 통해 초기동해 피해를 입은 콘크리트의 초음파 펄스 속도를 통한 압축강도 추정식 제안을 추후 과제로 남길 수 있을 것으로 판단된다.

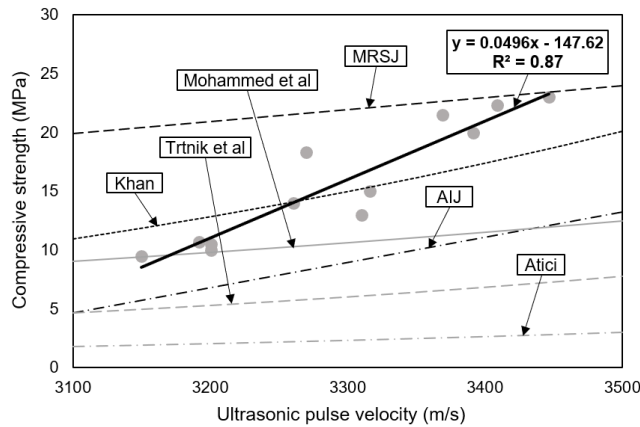


Figure 7. Correlation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity

Table 2. Estimation formula for compressive strength using ultrasonic pulse velocity

Materials Research Society of Japan[24]	$F_c = 0.0102 V_p - 11.7$
Architectural Institute of Japan[25]	$F_c = 0.0215 V_p - 62.0$
Atici[26]	$F_c = 0.0316e^{0.0013 V_p}$
Mohammed et al.[27]	$F_c = 0.7586e^{0.0008 V_p}$
Trtnik et al.[28]	$F_c = 0.0854e^{0.0012882 V_p}$
Khan[29]	$F_c = (0.0005208 V_p)^5$

4. 결론

본 연구에서는 초음파 속도법을 콘크리트의 초기동해 진단 방법으로서의 적용 가능성을 평가하기 위해 각각의 동결 깊이 에 따른 압축강도와 초음파 펄스 속도를 측정하였고 미세구조 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 동결 입힌 시험체를 실온으로 꺼낸 직후 육안관찰한 결과, 동결 깊이에 따른 명도 차이가 분명하여 초기동해 피해 정도 를 육안으로 구분할 수 있었다.
- 2) 동결 깊이가 증가할수록 압축강도와 초음파 펄스 속도는 감소하였으며 미세공극 및 균열이 많이 관찰되어 그에 따른 누적 공극량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 미세구조 특성을 통해 동결 깊이가 증가할수록 초기동해 피해 를 더 많이 받아 강도 발현 성능이 저하되어 압축강도 및 초음파 펄스 속도에 영향을 준 것으로 판단된다.
- 3) 회귀분석을 통한 압축강도와 초음파 펄스 속도의 상관관계를 분석한 결과, 추정식과 실험값과의 관계성을 나타내는 결정계수(R^2)가 0.87로 얻어져 동결 깊이에 따른 압축강도와 초음파 펄스 속도 사이의 상호 연관성이 존재하는 것으로 분석된다.
- 4) 본 실험 결과를 토대로 얻은 추정식은 기존의 초음파 펄스 속도를 통한 콘크리트의 압축강도 추정식과는 다른 양상을 보였으며, 이는 초기동해에 의한 천이대의 파괴 등과 같은 내구성 저하 요인의 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 추후 콘크리트 시험체를 대상으로 추가적인 실험을 통해 초기동해 피해를 입은 콘크리트의 초음파 펄스 속도를 통한 압축 강도 추정식 제안이 필요할 것으로 판단된다.

이와 같은 결론을 통해 초기동해를 입은 모르타르의 압축강도와 초음파 펄스 속도의 상호 연관성이 존재하는 것을 확인 하여 초음파 속도법을 통해 콘크리트의 초기동해를 진단하는 것이 가능하다고 판단된다. 하지만 본 연구 범위 내에서는 동 결 깊이에 따른 정량적인 분석에 한계점을 가지고 있어 향후 초기동해 피해 깊이에 따른 정량적인 피해 정도를 파악하기 위 한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또 실제 현장에 적용하기 위해서는 초음파 펄스 속도 측정 방법을 직접법이 아 닌 간접법을 사용하는 등의 현장 상황을 고려한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

요약

본 연구에서는 초음파 속도법을 콘크리트의 초기동해 피해를 진단하기 위한 방법으로서의 적용 가능성을 평가하기 위해 모르타르 시험체를 대상으로 각각 동결 깊이에 따른 압축강도와 초음파 펄스 속도를 측정하여 미세구조와 그 상관관계를 분 석하였다. 그 결과, 동결 피해를 입은 모르타르 시험체와 피해를 입지 않은 시험체 간의 압축강도와 초음파 펄스 속도 값의 차이가 확연하게 나타났으며, 미세구조 분석을 통해 동결 깊이가 증가할수록 초기동해 피해를 더 많이 받아 압축강도와 초 음파 펄스 속도가 감소하였다고 판단할 수 있었다. 회귀분석을 통해 상관관계를 분석한 결과, 추정식과 실험값과의 관계성 을 나타내는 결정계수(R^2)가 0.87로 얻어져 초기동해 피해 깊이에 따른 압축강도와 초음파 펄스 속도 사이의 상호 연관성이 존재하는 것으로 분석된다. 이에 따라 초음파 속도법을 통한 콘크리트의 초기동해 피해 진단이 가능하며, 그 피해 깊이를 정 량적으로 진단하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.


키워드 : 한중콘크리트, 초기동해, 비파괴시험, 초음파 속도법


Funding


This research was funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Korean government(MOLIT)(grant number RS-KA162704) and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant


funded by the Korea government(MSIT)(NRF-2021R1C1C1011347).

ORCID

Sohee Moon,  <https://orcid.org/0009-0009-3583-9395>

Taegyul Lee,  <https://orcid.org/0000-0002-1666-6689>

Heesup Choi,  <https://orcid.org/0000-0003-3548-524X>

Hyeonggil Choi,  <https://orcid.org/0000-0003-0976-2549>

References

1. Han MC, Han CG. *Giongwa Concrete [Temperature and Concrete]*. 1st ed. Seoul (Korea): Kimoondang; 2002. p. 64-72.
2. Korea Institute of Construction Technology. Development of advanced inspection and diagnosis process for concrete structures. Goyang (Korea): Korea Institute of Construction Technology; 2020 Dec. p. 19-21. Report No.: KICT 2020-193.
3. Choi HG, Zhang W, Hama Y. Method for determining early-age frost damage of concrete by using air-permeability index and influence of early-age frost damage on concrete durability. *Construction and Building Materials*. 2017 Oct;153:630-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.140>
4. Kim TW, Han MC. Early frost damage and diagnose of damage depth due to early frost damage of the concrete according to the thickness of members. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2019 Apr;19(2):131-8. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.2.131>
5. Hong SU, Cho YS. A Study on the Estimation of the Compressive Strength of Concrete Structures using Ultrasonic Pulse Velocity Method and Rebound Hardness Method. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2011 Jan;27(1):19-26.
6. Kim MH, Choi SJ, Kang SP, Kim JH, Jang JH. A study on the application of non-destructive testing equation for the estimation of compressive strength of high strength concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2002 Aug;2(3):123-30. <https://doi.org/10.5345/JKIC.2002.2.3.123>
7. Gucunski N, Feldmann R, Romero F, Kruschwitz S, Abu-Hawash A, Dunn M. Multimodal condition assessment of bridge decks by NDE and its validation. *Proceedings of the 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium*; 2009 Aug 20-21; AI. AI: Iowa State University; 2009. p. 1-19.
8. Kim MW, Oh H, Oh KC. Estimating the compressive strength of high-strength concrete using surface rebound value and ultrasonic velocity. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2016 Mar;20(2):1-9. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.2.001>
9. Hong SW, Lee YT, Kim SH, Kim JH. Estimation of compressive strength of reinforced concrete vertical and horizontal members using ultrasonic pulse velocity method. *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2018 Nov;22(6):197-205. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.6.197>
10. Yang H, Lin Y, Hsiao C, Liu JY. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Safety Journal*. 2009 Jan;44(1):121-30. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.003>
11. Benedetti A. On the ultrasonic pulse propagation into fire damaged concrete. *Structural Journal*. 1998 Jan;95(3):259-71. <https://doi.org/10.14359/544>
12. Lie TT, Rowe TJ, Lin TD. Residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns. *Special Publication*. 1986 Jan;92:153-74. <https://doi.org/10.14359/6517>

13. Hwang EC, Kim GY, Choe GC, Yoon MH, Gucunski N, Nam JS. Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*. 2018 May;171:511-20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.178>
14. Komlos K, Popovics S, Nürnbergerová T, Babal B, Popovics JS. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cement and Concrete Composites*. 1999 Feb;18(5):357-64. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00026-1](https://doi.org/10.1016/0958-9465(96)00026-1)
15. Turgut P, Kucuk OF. Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2006 Nov;42(11):745-51. <https://doi.org/10.1134/s1061830906110064>
16. Bogas JA, Gomes MG, Gomes A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*. 2013 Jul;53(5):962-72. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
17. Li B, Zhang LY, Li M, Pu H, Ma C, Qiu PT. Microstructural features of freezing and thawing-creep damages for concrete mixed with fly ash. *Geofluids*. 2021 Mar;2021:1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/6641419>
18. Kong X, Cui S, Wang G, Hu W, Liang Y, Zhang Z. Evolution law and mechanism of freeze – thaw damage of cement-stabilized weathered sand. *Coatings*. 2022 Feb;12(2):272. <https://doi.org/10.3390/coatings12020272>
19. Lee BN, Lee JS. Freeze-thaw resistance estimation of concrete using surface roughness and image analysis. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2018 May;22(3):1-7. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.3.001>
20. Zuo Y, Ye G. Pore structure characterization of sodium hydroxide activated slag using mercury intrusion porosimetry, nitrogen adsorption, and image analysis. *Materials*. 2018 Jun;11(6):1035. <https://doi.org/10.3390/ma11061035>
21. Ji HG, Kim GD, Choi DK, Kim IH, Choi Y. Strength estimation of concrete exposed to high temperatures using UPV method. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2019 Jan;21(1):49-56.
22. Breyse D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*. 2012 Aug;33:139-63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>
23. Kim MH, Choi SJ, Kang SP, Kim JH, Jang JH. A study on the application of non-destructive testing equation for the estimation of compressive strength of high strength concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2002 Aug;2(3):123-30. <https://doi.org/10.5345/JKIC.2002.2.3.123>
24. Japan Society for Testing and Materials. Guideline for evaluation of compressive strength of concrete by Schmidt Hammer (draft), materials testing. Kyoto (Japan): Japan Society for Testing and Materials; 1958. p. 7-59.
25. Architectural Institute of Japan. Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 1983. p. 26.
26. Atici U. Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network. *Expert Systems with Applications*. 2011 Aug;38(8):9609-18. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.156>
27. Mohammed BS, Najwa JA, Abdullahi M. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*. 2011 Mar;25(3):1388-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.004>
28. Trtnik G, Franci K, Goran T. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*. 2009 Jan;49(1):53-60. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>
29. Khan MI. Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012 Apr;61:125-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.013>