

Research Paper

굵은 골재의 종류와 초음파 속도의 관계성을 고려한 콘크리트 수직 거푸집 해체 시점 분석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Concrete Vertical form Demolding Timing Considering the Relationship between the Type of Coarse Aggregate and Ultrasonic Pulse Velocity

남영진¹ · 김원창² · 최형길³ · 이태규^{4*}

Nam, Young-Jin¹ · Kim, Won-Chang² · Choi, Hyeong-Gil³ · Lee, Tae-Gyu^{4*}

¹Master's Course, Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

²Doctor's Course, Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

³Professor, School of Architecture, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

⁴Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

*Corresponding author

Lee, Tae-Gyu

Tel : 82-43-649-1315

E-mail : ltg777@semyung.ac.kr

Received : October 24, 2023

Revised : November 6, 2023

Accepted : November 9, 2023

ABSTRACT

This research assesses the mechanical properties of concrete, utilizing both normal and lightweight aggregates, through measurements of compressive strength and ultrasonic pulse velocity. The study observed that concrete with normal aggregates exhibited higher compressive strength in its initial stages, whereas concrete with lightweight aggregates showed increased strength over time, likely attributed to the higher water absorption rate of lightweight aggregates. Ultrasonic pulse velocity generally registered higher in normal aggregate concrete, barring a specific duration, presumably due to variations in the internal pore structure of the aggregates. The correlation coefficient(R^2) for the strength prediction equation, derived from the relationship between compressive strength and ultrasonic pulse velocity, exceeds 0.95. This high correlation suggests that the predictive equation based on these experimental findings is a reliable method for estimating concrete strength.

Keywords : concrete, coarse aggregate, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, form demolding timing

1. 서론

최근 도시 개발로 인해 도시에 인구가 밀집하는 현상이 지속해서 나타나고 있으며, 한정적인 도시 지형에서 많은 인구를 수용하기 위해서 고층 건축물의 수가 늘어나고 있는 실정이다. 고층 건축물은 높이가 높아질수록 건축물의 하중은 점차 증가하여 구조적 변형에 따른 균열, 크리프 변형 등으로 인한 건축물 붕괴 사고가 이어질 수 있다. 콘크리트에서 골재의 비율이 가장 높기 때문에 골재의 변경이 가장 높은 질량을 감소한다고 알려져 있으며, 콘크리트의 하중을 줄이기 위해 기존 연구자들은 경량콘크리트에 관한 연구를 지속해서 수행되고 있다. 그중 콘크리트에서 가장 많은 부피를 차지하는 골재를 변경하는 것이 하중을 가장 많이 감소시키는 방법이라고 판단된다. 일반적으로 쓰이는 보통골재에서 경량골재로 대체했을 때 하중이 감소하고, 단열과 흡음 성능이 향상된다고 기존 연구에서 알려졌다[1,2].



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 경량골재는 보통골재 대비 많은 양의 공극으로 인해 흡수율이 증가하여 보통골재 콘크리트 대비 낮은 강도로 발현된다[3]. 압축강도는 콘크리트의 품질 및 다른 강도에 대한 평가를 할 수 있는 지표이다. 낮은 강도 발현은 건설 시공 진행에 있어서 큰 문제점이 될 수 있기 때문에 초기 재령에서의 강도 발현을 정량적이고 정확한 방법으로 평가해볼 필요가 있다고 판단된다.

초기 재령에 있어 거푸집 해체 시점에 대한 평가는 시방서에 따라 시간 또는 강도 발현으로 확인하는 등 상이하게 확인할 수 있게 되어있다. 한국과 일본 등과 같은 아시아권의 경우 강도 기준을 적용하고, 유럽과 미국 등과 같은 국가에서는 경과시간으로 평가를 진행한다[4-7]. 하지만 콘크리트의 압축강도는 환경 및 재료적인 영향을 직접적으로 받기 때문에 시간으로 확인하여 거푸집 해체를 진행할 경우 건축물 붕괴와 같은 사고가 발생할 수 있다[8]. 이러한 이유로 인해 일본과 한국의 시방서와 유사하게 강도 기준을 적용하여 확인하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해 벽이나 기둥의 코어를 채취하여 압축강도를 측정한다. 하지만 이러한 코어 채취는 구조적으로 문제가 발생할 수 있고 보수를 진행해도 100%의 복구를 하지 못한다. 또한 파괴공법은 비파괴공법 대비 상대적으로 많은 양의 비용과 시간이 사용된다. 또한 초기 시공 단계에서 시간 절감은 비용 절감과 직결되기 때문에 콘크리트의 수직 거푸집 해체 시점을 파악하는 것이 중요하다. 하지만 압축강도는 콘크리트의 복잡한 수화 메커니즘과 내부 공극에 대한 변화의 모니터링이 수월하지 않다고 판단되며, 콘크리트의 압축강도를 정량적이고 정확하게 판단할 수 있는 비파괴공법으로 측정할 필요가 있다고 판단된다[9].

콘크리트의 강도 평가를 위한 비파괴공법에 관한 다양한 연구가 수행하고 있으며, 레이저, 전자파, 슈미트해머 등을 사용하여 건축물 구조의 손상 등을 감지하고 평가하기 위해 활용된다. 그중 콘크리트의 평가를 위해 초음파 속도에 관한 연구가 지속해서 수행되었으며, 콘크리트의 균열과 내부 결함 등을 감지하는 데 사용할 수 있다[10]. 콘크리트를 평가하기 위해 초음파 속도를 활용하는 것은 즉각적인 결괏값의 도출로 인한 시간 및 비용적인 측면에서도 감소할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보통골재 및 경량골재 콘크리트의 초기 재령에서 거푸집 해체 강도의 발현 시점을 평가하기 위해 압축강도를 측정하였다. 또한 그 시점에서의 초음파 속도 측정을 통해 압축강도를 예측하기 위해 상관관계를 나타낸 후 강도 예측식을 제안하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

Table 1에서 본 연구의 실험 계획을 나타냈으며, 시험체는 콘크리트와 모르타르로 설정하였다. 양생 조건의 경우 양생실의 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도는 $60 \pm 5\%$ 로 설정하였으며, 양생기간은 초기 재령에서 거푸집 해체 강도의 발현 시점을 평가하기 위해 24시간으로 설정하였다. 본 실험에서 거푸집 해체 강도의 발현 시점을 정량적으로 평가하기 위해 압축강도와 초음파 속도를 측정하였다.

Table 1. Factors considered in the experiment

Contents	Detail
Concrete	Normal aggregate concrete(NC), Lightweight aggregate concrete(LC)
Mortar	Mortar(M)
Curing conditions	Room temperature: $20 \pm 2^\circ\text{C}$, Humidity: $60 \pm 5\%$
Curing time	24 hours
Mechanical properties	Compressive strength(MPa), Ultrasonic pulse velocity(km/s)

2.2 실험 재료

Table 2에서는 본 연구에서 사용된 재료의 물리적 특성에 대해 나타냈다. 본 실험에서 사용한 시멘트의 경우 밀도는 3.15g/cm^3 , 분말도는 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ 이며, 골재는 보통골재와 경량골재를 사용하였다. 보통골재는 부순 화강암 골재로 밀도는 2.68g/cm^3 , 조립률은 7.03, 흡수율은 0.68%인 것을 사용하였으며, 경량골재는 석탄재 골재로 밀도는 1.47g/cm^3 , 조립률은 6.39, 흡수율은 8.68%인 것을 사용하였으며, 보통골재와 경량골재의 최대 크기는 20mm이다. 잔골재는 강모래로 밀도는 2.54g/cm^3 , 조립률은 2.54, 흡수율은 1.60%인 것을 사용하였으며, 혼화제의 경우 실험의 작업성을 높이기 위해 폴리카르본산계 감수제를 사용하였다. 모르타르의 경우 동일한 실험 환경을 조성하기 위해 콘크리트에서 골재만 체를 통해 걸러서 실험을 진행하였다. Table 3에서는 본 연구에서 사용된 시멘트의 화학적 조성을 나타냈다.

Table 2. Physical properties of the materials used

Materials		Properties
Cement	Type I ordinary Portland cement	Density: 3.15g/cm^3 , Fineness: $3,200\text{cm}^2/\text{g}$
Coarse aggregate	Crushed granite aggregate	Density: 2.68g/cm^3 , Fineness modulus: 7.03 Absorption: 0.68%, Maximum size: 20mm
	Coal ash aggregate	Density: 1.47g/cm^3 , Fineness modulus: 6.39 Absorption: 8.68%, Maximum size: 20mm
Fine aggregate	River sand	Density: 2.54g/cm^3 , Fineness modulus: 2.54 Absorption: 1.60%
	Super plasticizer	Poly carboxylic-based acid

Table 3. Chemical properties of cement

Materials	Chemical composition(%)								L.O.I ¹⁾
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Others	
OPC ²⁾	60.34	19.82	4.85	3.30	3.83	2.88	1.08	0.86	3.02

1) L.O.I: Loss on Ignition.

2) OPC: Type I ordinary Portland cement.

2.3 실험 배합 및 방법

Table 4에서는 본 연구에서 사용된 콘크리트 배합표를 나타내고 있으며, 현재 건설 현장에서 목표강도 30MPa와 45MPa를 주로 사용하고 있어 본 실험에서 목표강도를 맞추기 위해 W/C 41.0%와 33.0%로 설정하였다.

Table 5에서는 본 실험에서 측정하는 프로그램을 나타낸 것이며, 콘크리트는 압축강도와 초음파 속도를, 모르타르는 초기 재령에서 시멘트 페이스트의 경향을 모니터링을 위해 초음파 속도만 측정하였다. 콘크리트의 물성이 6시간 이전에는 경화가 진행되지 않았을 시점이기 때문에 6시간부터 해체 후 시험체의 압축강도와 초음파 속도의 측정을 진행하였다. 또한 초음파 속도를 측정하는 데 있어 시험체와 탐촉자를 밀접한 접촉을 위해 Vacuum grease를 발라 측정을 진행했다. 초음파 속도는 발신기에서 수신기까지 도달하는 시간을 측정하며, 물리적 신호가 전기적 신호로 변환되어 디스플레이에 나타나는 속도를 통해 측정하였다. 시험체의 재령 6시간부터 24시간까지를 측정하였으며, 압축강도와 초음파 속도를 120분마다 측정을 진행하였다. 압축강도는 KS F 2405, 초음파 속도는 KS F 2731의 기준에 맞게 측정을 진행하였다. 또한 그래프의 경우 각 시험체 간의 압축강도는 평균값과의 최대 편차가 1.2MPa 그리고 초음파 속도의 경우 0.04km/s로 미미한 차이가 나기 때문에 평균값으로 사용하여 나타냈다.

Table 4. Mix proportions of the normal concrete(NC) and lightweight concrete(LC)

MIX ID	F _{cu} ¹⁾ (MPa)	W/C ²⁾ (%)	S/a ³⁾ (%)	Unit weight(kg/m ³)			
				W ⁴⁾	C ⁵⁾	S ⁶⁾	G ⁷⁾
LC41	30	41.0	46.0	165	400	781	530
NC41				165	400	781	967
LC33	45	33.0	43.0	165	500	695	533
NC33				165	500	695	972

1) F_{cu}: design compressive strength; 2) W/C: water/cement; 3) S/a: sand/aggregate; 4) W: water; 5) C: cement; 6) S: sand 7) G: Gravel.

Table 5. Experimental procedure

Specimen	Mechanical properties	Measurement standard	Measurement time
			6 – 24 hours
Concrete	Compressive strength(MPa)	KS F 2405	2 hours
	Ultrasonic pulse velocity(km/s)	KS F 2731	
Mortar	Ultrasonic pulse velocity(km/s)		

3. 실험 결과

3.1 초기 재령에서의 콘크리트 압축강도

Figure 1에는 콘크리트의 초기 재령에서 압축강도를 나타냈다. 콘크리트의 압축강도는 시간이 경과함에 따라 점차 증가율이 높아진다는 것을 알 수 있으며, 압축강도가 시간에 따라 이차방정식의 그래프와 유사한 경향을 나타내기 때문에 추세선의 경우 지수함수를 통해 나타냈다. W/C 비율에 따라 상관계수(R²)는 유사한 값을 나타냈으며, NC33과 LC33은 0.88과 0.87을, NC41과 LC41은 0.97과 0.98을 나타냈다.

W/C 33.0%의 경우 재령 초기부터 12시간까지 NC33이 LC33에 비해 높은 압축강도를 보였다. 14시간에서 NC33이 LC33에 비하여 20.4% 낮은 압축강도를 나타냈으며, 시간이 경과함에 따라 NC33이 미미한 차이로 LC33보다 낮은 경향을 보였다. 초기 재령에서 LC가 NC와 같거나 높은 압축강도를 나타낸 이유는 경량골재의 높은 흡수율로 인해 시멘트에 수화 반응을 촉진했다고 판단된다[11].

W/C 41.0%의 경우 재령 초기에서의 압축강도는 NC41과 LC41이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 16시간에 NC41은 4.1MPa, LC41은 2.9MPa로 NC41이 41.3% 높은 압축강도를 나타냈다. 하지만 시간이 경과하면서 20시간에는 NC41과 LC41이 유사한 경향을 나타냈다.

수직 거푸집 해체 시점인 5MPa를 NC41과 LC41은 20시간에서 5.7MPa와 5.2MPa를 나타냈다. NC33과 LC33은 12시간에서 5.3MPa와 5.1MPa를 나타냈으며, W/C의 차이에 따라 콘크리트의 압축강도 발현 시점이 상이하다는 것을 알 수 있다.

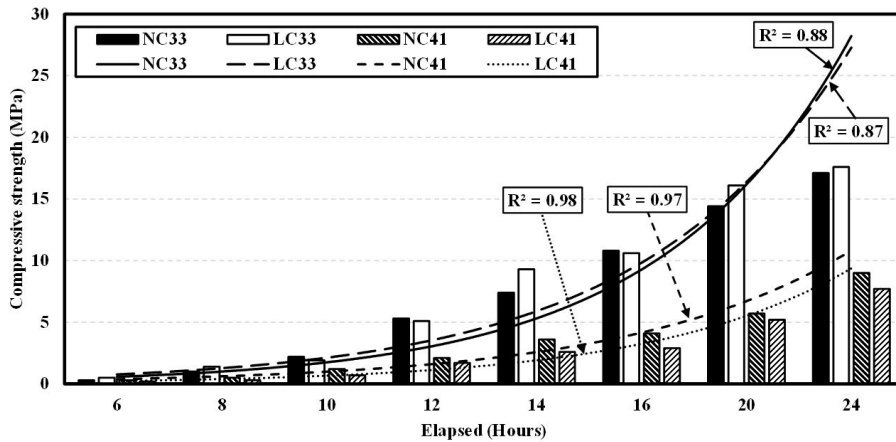


Figure 1. Compressive strength of concrete

3.2 초기 재령에서의 모르타르 및 콘크리트 초음파 속도

초음파 속도는 시간이 경과함에 따라 낮은 증가율을 나타냈으며, 로그함수의 상관계수가 가장 큰 값을 나타냈기 때문에 로그함수를 통해 추세선을 나타냈다.

Figure 2에서는 초기 재령에서 모르타르의 초음파 속도를 나타내고 있다. M33과 M41은 6시간에서 8시간까지 약 두 배 이상의 초음파 속도 차이를 나타냈으며, 10시간 이후부터 14시간까지 초음파 속도의 차이가 줄어들었다가 16시간의 약 1.5 배 정도의 차이를 나타냈다. 20시간에서 24시간까지의 M33과 M41의 초음파 속도 차이는 유사하게 나타났으며, 추세선의 차이의 범위는 6시간부터 24시간까지 유사하게 나타났다. 또한 시간에 따른 초음파 속도와와의 관계에서 M33은 0.85, M41은 0.86의 상관계수(R^2)의 값을 나타냈다. W/C 비율이 낮을수록 높은 초음파 속도를 나타내는 이유는 시멘트 함유량이 증가하는 시험체의 내부를 더 밀실하게 해주기 때문이라 판단된다[12].

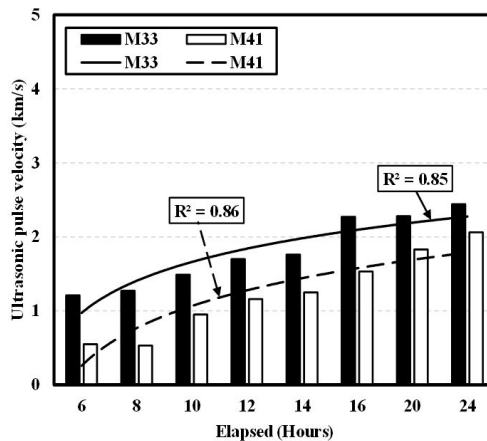


Figure 2. Ultrasonic pulse velocity in mortar

Figure 3에서는 초기 재령에서의 콘크리트의 초음파 속도를 나타냈다. W/C 33.0%에서 초기 초음파 속도는 LC33이 NC41보다 14.4% 낮은 1.04km/s를 나타냈으며, 6시간에서는 NC가 더 높은 경향을 나타냈다. 하지만 8시간부터 12시간까지 LC33의 초음파 속도가 NC33보다 더 높은 속도를 나타냈으며, 이러한 경향은 압축강도에서 설명한 것과 유사하게 경향

골재의 흡수율로 인해 수화반응을 촉진했기 때문이라고 판단된다. 14시간 이후에서는 NC33이 LC33보다 더 높은 초음파 속도를 나타내고 있다. W/C 41.0%에서는 6시간에서는 NC41의 초음파 속도가 LC41의 초음파 속도 대비 40.0% 높게 나타났으며, 10시간까지 NC41이 LC41보다 높은 경향을 보였다. 하지만 12시간에서 14시간에서 NC41과 LC41의 초음파 속도의 차이가 낮았으며, 16시간 이후의 초음파 속도는 NC41이 지속해서 높은 경향을 나타냈다. 이렇게 NC가 LC의 초음파 속도보다 높은 경향을 나타내는 것은 골재의 내부 공극의 크기 및 개수에 따라 차이가 발생했다고 판단된다[13].

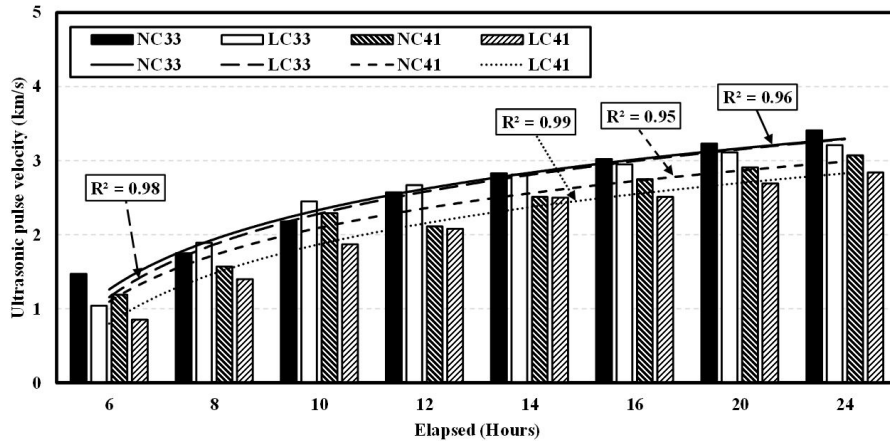


Figure 3. Ultrasonic pulse velocity in concrete

3.3 압축강도와 초음파 속도의 상관관계

압축강도의 시간 경과에 따른 증가율이 초음파 속도의 시간 경과에 따른 증가율보다 높은 경향을 나타냈다. 이러한 경향으로 본 연구에서 사용한 상관관계 그래프는 이차방정식의 그래프와 유사하므로 지수함수의 추세선을 통해 나타냈다. Figure 4(a)에서는 압축강도와 초음파 속도에 따른 상관관계를 W/C 비율 및 골재에 따라 나타냈다. NC33과 LC33은 유사한 경향의 추세선을 나타내고 있으나 LC41이 NC41보다 높은 기울기를 나타내고 있다. 수직 거푸집 해체 시점이 5MPa에 도달하는 시점에서의 초음파 속도는 NC33은 2.57km/s를 LC33은 2.67km/s를 나타내고 있으며, NC41은 2.91km/s를 LC41은 2.69km/s를 보였다.

$$F_{cu} = 0.03 \times \exp(1.92 \times Vp) \tag{1}$$

$$F_{cu} = 0.04 \times \exp(1.87 \times Vp) \tag{2}$$

Figure 4(b)에서는 W/C 33.0%와 41.0%에서 나타난 콘크리트의 압축강도와 초음파 속도를 통한 상관관계를 분석하여 다음과 같은 식 (1)과 식 (2)의 그래프를 지수함수 형태로 나타냈다. 식 (1)은 보통골재 콘크리트를 나타내는 NC와 식 (2)는 경량골재 콘크리트를 나타내는 LC로 나타냈으며, LC가 NC보다 높은 기울기를 나타낸 이유는 동일 압축강도에서 나타내는 초음파 속도가 LC가 NC보다 느리게 나타냈기 때문이다. 각각의 강도 예측 식은 상관계수가 0.95를 상회하였으며, 초기 재령에서 강도 예측식을 활용해 예측할 수 있다고 판단된다.

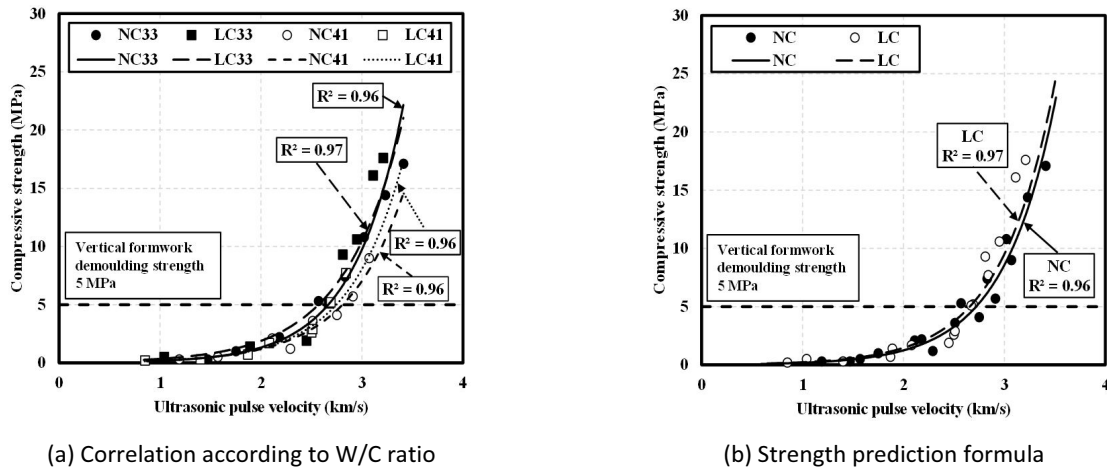


Figure 4. Correlation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity

Table 6. Formulas for predicting concrete compressive strength in concrete with various aggregates

Aggregate	Predictive Model
Recycle aggregate[14]	$F_{cu} = 0.0018 \times \exp(2.1685 \times Vp)$
Palm oil clinker[15]	$F_{cu} = 0.1982 \times Vp \times \exp(3.79)$
Limestone[16]	$F_{cu} = 0.042 \times Vp \times 1000 - 134.05$
Lightweight aggregate[17]	$F_{cu} = 0.0262 \times \exp(1.81 \times Vp)$

Table 6에는 기존에 연구된 강도 예측 식을 나타냈으며, 예측식은 재활용 골재, 야자 껍질 골재, 석회암, 경량골재의 자료를 수집하여 나타냈다. Figure 5에는 본 연구를 통해 나타낸 (1)과 (2)를 기존에 연구된 다양한 골재의 강도 예측 식을 비교하여 나타냈다. 야자 껍질 골재와 석회암의 강도 예측 식은 선형함수를 나타냈지만, 나머지 골재의 강도 예측 식은 지수함수 형태를 나타냈다. 본 연구에서 나타낸 식과 가장 유사한 기울기를 나타내는 것은 석회암과 경량골재이며, 초음파 속도 3.50km/s에서 나타내는 압축강도는 (1)은 22.5MPa, (2)는 24.3MPa, 석회암은 13.0MPa 그리고 경량골재는 14.8MPa를 나타냈다. 야자 껍질 골재와 재활용 골재의 강도 예측 식은 타 골재와 상이한 경향을 나타냈으며, 이러한 경향은 사용한 골재의 기계적 성질과 사용한 시멘트의 화학적 조성이 상이하기 때문이라 판단된다[18].

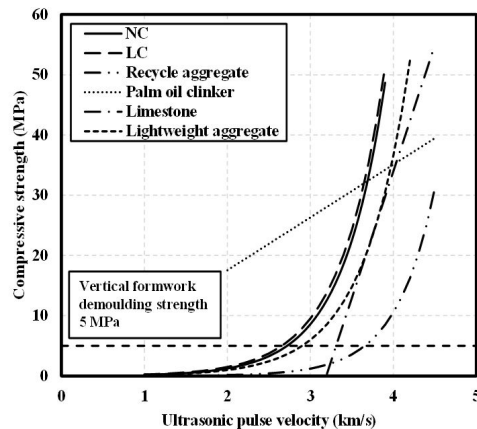


Figure 5. Comparative analysis with existing strength prediction models for various aggregates

4. 결론

본 연구에서는 보통골재 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 압축강도와 초음파 속도를 측정하였으며, 측정 항목의 상관관계를 통해 강도 예측 식을 제안하여 다음과 같은 결과를 나타냈다.

- 1) 보통골재 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 압축강도는 W/C 33.0%와 W/C 41.0% 모두 재령 초기에는 미미한 차이를 보였으나 시간이 경과함에 따라 경량골재 콘크리트가 높은 경향을 나타냈다. 초기 재령에서는 시멘트의 수화생성물이 완전히 만들어지지 않은 시점이며, 보통골재 대비 흡수율이 높은 경량골재 내부에서 물이 수화반응을 촉진했기 때문에 이러한 경향이 나타났다고 판단된다.
- 2) W/C 비율에 따른 모르타르의 초음파 속도의 경향이 상이하다는 것을 알 수 있으며, W/C 비율이 낮아짐에 따라 시멘트 함유량이 많아져 내부 공극의 수가 줄어들기 때문이라고 판단된다. 이러한 경향은 콘크리트의 초음파 속도에도 나타났으며, 보통골재와 경량골재의 내부 공극 차이로 인해 보통골재가 높은 초음파 속도를 나타냈다.
- 3) 콘크리트의 압축강도와 초음파 속도의 상관관계에서 NC33과 LC33의 경우 12시간에 5MPa를 NC41과 LC41은 20시간에 5MPa 도달하였다. 본 실험을 통한 압축강도 예측식의 경우 경량골재 콘크리트가 보통골재 콘크리트 대비 높은 기울기의 그래프를 나타냈다. 또한 NC와 LC의 경우 0.95 이상의 높은 상관관계를 나타내기 때문에 본 실험에서 나타난 예측식을 통해 압축강도 예측이 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 본 실험을 통한 강도 예측식과 다양한 골재의 기존 강도 예측식은 형태는 유사하였으나 그 수치와 관계성은 상이한 결과를 보였다. 이러한 경향은 골재의 기계적 특성 및 사용한 시멘트의 화학적 조성 등이 초음파 속도에 미치는 영향이 큰 요인으로 판단된다.

본 연구에서는 재령 1일에 대한 콘크리트의 압축강도와 초음파 속도를 수직 거푸집 기준에 대해 분석하였으나 골재와 시멘트 페이스트 사이의 복잡한 관계성에 대한 연구가 미흡하다고 판단된다. 추후 연구에서는 골재와 시멘트 페이스트 즉 계면 상태에 대한 미세분석에 대한 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

요약


본 연구에서는 보통 및 경량 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위해 압축강도와 초음파 속도를 측정하였다. 압축강도에서는 재령 초기에서 보통골재 콘크리트가 높은 경향을 나타냈으나 시간 경과에 따라 경량골재 콘크리트가 높아지는 것을 알 수 있으며, 경량골재의 특징 중 높은 흡수율의 영향이라고 판단된다. 초음파 속도에서는 일정 시간을 제외하고 대부분 보통골재가 높은 경향을 나타냈으며, 골재의 내부 공극의 차이라고 판단된다. 압축강도와 초음파 속도의 상관관계를 통한 예측식의 상관관계수(R^2)가 0.95를 상회하며, 본 실험을 통한 예측식으로 강도 예측의 신뢰성이 높다고 판단된다.

키워드 : 콘크리트, 굵은 골재, 압축강도, 초음파 속도, 거푸집 해체 시점


Funding


This research was funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Korean government(MOLIT)(grant number RS2021-KA162704).

ORCID

Young-Jin Nam,  <https://orcid.org/0009-0001-1586-4173>

Won-Chang Kim,  <https://orcid.org/0000-0003-1838-0876>

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

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

References

1. Aslam M, Shafiq P, Nomeli MA, Jumaat MZ. Manufacturing of high-strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2017 Sep;13:53-62. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.002>
2. Qurashi MA, Shah SAR, Farhan M, Taufiq M, Khalid W, Arshad H, Tayyab M, Shahzadi G, Waseem M. Sustainable design and engineering: A relationship analysis between digital destructive and non-destructive testing process for lightweight concrete. *Processes*. 2019 Nov;7(11):791. <https://doi.org/10.3390/pr7110791>
3. Cui HZ, Lo TY, Memon SA, Xu W. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012 Oct;35:149-58. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.053>
4. KASS 5. Korea architectural standard specification reinforced concrete work. Seoul (Korea): Architectural Institute of Korea. 2009. p. 93-5.
5. JASS 5. Japanese architectural standard specification. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2009. p. 74-7.
6. ACI 347-04. Guide to formwork for concrete. MI: American Concrete Institute Committee; 2005. p. 9-16.
7. BS EN 13670:2009. Execution of concrete structures. London(United Kingdom): European Committee for Standardization (CEN), British Standards Institute (BSI); 2010. p. 24-8.
8. Popovics S, Rose JL, Popovics JS. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. *Cement and Concrete Research*, 1990 Mar;20(2):259-70. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90079-D](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90079-D)
9. Pellegrino F, Salvador R, Aparicio S, Hernández MG, Anaya JJ, Cavalaro SHP, Segura I. Continuous monitoring of early-age properties of sprayed mortars by in situ ultrasound measurements. *Construction and Building Materials*. 2021 Jul;292:123389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123389>
10. ACI 228.2R-13. Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete. MI: American Concrete Institute; 2013. p. 3-5.
11. Kim W, Jeong K, Choi H, Lee T. Correlation analysis of ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of normal aggregate and lightweight aggregate concretes in 30 – 60MPa range. *Materials*. 2022 Apr;15(8):2952. <https://doi.org/10.3390/ma15082952>
12. Kim HM, Alengaram UJ, Jumaat MZ. Bond properties of lightweight concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 2016 Jun;112:478-96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.125>
13. Kim BC, Kim JY. Characterization of ultrasonic properties of concrete. *Mechanics Research Communications*. 2009 Mar;36(2):207-14. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.07.003>
14. Al-Mufti RL, Fried AN, The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. 2012 Dec;37:379-86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.058>
15. Ahmmad R, Jumaat MZ, Alengaram UJ, Bahri S, Rehman MA, Hashim H, Performance evaluation of palm oil clinker as coarse aggregate in high strength lightweight concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016 Jan;112(1):566-74. <https://doi.org/>

10.1016/j.jclepro.2015.08.043

16. Craeye B, van de Laar H, J. van der Eijk J, Gijbels W, Lauriks L. On-site strength assessment of limestone based concrete slabs by combining non-destructive techniques. *Journal of Building Engineering*. 2017 Sep;13:216-23. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.08.006>
17. Chang TP, Lin HC, Chang WT, Hsiao JF, Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods. *Cement and Concrete Composites*. 2006 Jan;28(1):57-68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.08.003>
18. Lee T, Lee J. Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age. *Construction and Building Materials*. 2020 Aug;252:119027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119027>