

Research Paper

# 비소성 황토 결합재를 혼합한 콘크리트의 강도 발현 평가를 위한 초음파 속도법의 검토

## A Study on Evaluating the Compressive Strength Development of Concrete Mixed with Non-sintered Hwangto Admixture by an Ultrasonic Method

김정욱<sup>1</sup> · 김원창<sup>2</sup> · 김규용<sup>3</sup> · 이태규<sup>4\*</sup>

Kim, Jeong-Wook<sup>1</sup> · Kim, Won-Chang<sup>2</sup> · Kim, Gyu-Yong<sup>3</sup> · Lee, Tae-Gyu<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Doctor's Course, Department of Architectural Engineering, Chungnam University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

<sup>2</sup>Master's Course, Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

<sup>4</sup>Professor, 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 : November 15, 2022

Revised : November 28, 2022

Accepted : November 30, 2022

### ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of concrete mixed with non-sintered hwangto(NHT) as an alternate material for cement were evaluated, and the compressive strength prediction equation of concrete based on ultrasonic pulse velocity analysis was proposed. Cement replacement rates for mixed NHT were set to 0, 15, and 30%, and design compressive strength was set to 30 and 45MPa to evaluate the effect on the amount of cement and NHT powder. The mechanical properties items analyzed were compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and elastic modulus, and were measured on days 1, 3, 7, and 28. As the replacement rate of NHT increased, the mechanical properties tended to decrease. In addition, as a result of analyzing the correlation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity, the correlation coefficient( $R^2$ ) showed a high relationship( $R^2=0.95$ ) on concrete mixed with NHT.

**Keywords :** concrete, non-sintered hwangto, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, prediction model of compressive strength

## 1. 서론

현재 전 세계적으로 온실가스에 따른 대기 온도 상승 및 이상 기후 등의 문제점이 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위해 국가간 탄소배출저감에 관한 협정 및 정책 등을 통해 온실가스 저감에 신경을 기울이고 있다[1,2]. 특히, 건설 업종에서는 시멘트 사용에 따른 CO<sub>2</sub>배출을 최대한 저감하기 위한 연구가 대두되고 있다. 시멘트 소성 과정에서 발생하는 온실가스의 경우 전체 온실 가스 배출량의 대략 10%를 차지하고 있으며, 시멘트 수요량은 세계적으로 점차 증가하는 추세이다[3,4]. 따라서 산업 부산물 및 천연 광물을 시멘트 대체 재료로 활용하여 온실가스를 저감할 수 있는 다양한 연구가 활발하게 수행되고 있는 실정이다[5].

천연 광물 중 황토의 경우 이전 연구자들에 의해 시멘트 대체 재료로서 연구가 수행되었으며 몇 가지 긍정적인 특징을 보였다[6]. 지표면의 약 10%에 분포하고 있는 광물로서 취득이 용이하다는 장점이 있으며, 황토의 주요 화학 성분은 산업 부산물인 플라이애쉬 및 고로슬래그 등과 유사한 비율로 조성된다[7]. 플라이애쉬 및 고로슬래그 등의 산업 부산물의 경우 알



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.

칼리 자극에 의한 포졸란 반응에 의한 강도, 내구성 등의 향상 효과가 있다. 기존의 황토를 활용한 연구에서는 화학성분이 혼화재료로서 활용이 가능할 것으로 예측되어 반응성을 높은 활성황토를 혼합한 연구가 많이 이루어졌다[8]. 그러나, 활성황토의 경우 소성 과정에서 또한 온실가스가 배출되기 때문에, 본 연구에서는 탄소 저감 취지에 맞게 비소성 황토(NHT, Non-sintered hwangto)를 시멘트 대체 재료로서 활용한 연구를 수행하였다(Figure 1 참조).

기존 NHT를 시멘트 대체 재료로서 활용한 연구 결과에 따르면 NHT 치환율이 증가함에 따라 상대적으로 낮은 단위 시멘트량의 영향으로 낮은 단위중량, 낮은 압축·휨·인장 강도 발현 및 높은 공극률을 보였다[9]. 따라서, NHT를 혼합한 콘크리트의 경우 시공 및 유지·보수 단계에서의 구조·재료적 안전성을 파악하는 것이 중요하다고 판단된다. 이에 비소성 황토 결합재를 혼합한 콘크리트의 초기 재령에서의 압축강도 발현 메카니즘에 대한 이해는 반드시 필요하며, 이를 바탕으로 안정적인 강도가 발현될 수 있는 프로세스를 검토할 필요가 있다. 이러한 강도발현에 대한 평가는 파괴시험으로는 파악하는 것이 난해하기 때문에 화학적 결합구조에 의한 내부 매트릭스 형성단계를 파악하기 위해서는 비파괴 공법을 활용하는 것이 유리하다. Figure 2에 기존 연구자들에 의해 제안된 초음파 속도법을 통한 강도 예측 모델을 나타냈으며, 사용된 재료 및 강도 범위에 따라 상이한 형태로 나타나기 때문에, 별도의 NHT를 혼합한 콘크리트 강도 예측 모델이 제안되어야 한다고 판단된다[10-14]. 따라서, 본 연구에서는 시멘트 대체 재료로서 NHT를 활용하여 역학적 특성의 정량적인 평가를 수행하였으며, 초음파 속도법을 활용하여 NHT를 혼합한 콘크리트의 강도 예측식을 제안하였다.



Figure 1. Non-sintered hwangto

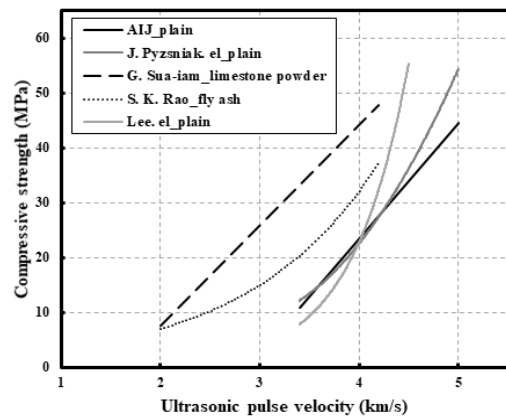


Figure 2. Previous prediction model of compressive strength on concrete by ultraosnic pulse velocity

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

Table 1에 본 연구의 실험 계획을 나타냈다. 시험체의 경우 NHT를 혼합하지 않은 plain concrete(PC) 및 혼합한 non-sintered hwangto concrete(NHTC)로 설정하였다. 기존 수행된 연구에 따르면 황토를 시멘트의 약 15~20%를 치환할 경우 약간의 강도 증진 및 수렴하는 경향을 보였으며, 약 30% 이상을 치환할 경우 현저한 강도 저하를 보였다. 따라서, 본 연구에서는 비소성 황토 치환율에 따른 역학적 특성을 평가하기 위해 NHT의 경우 시멘트 대체 비율은 0, 15 및 30%로 설정하였다. 또한, 다양한 강도에서의 황토 혼합에 따른 역학적 특성을 평가하기 위해 NHT를 혼합하지 않은 PC의 목표 강도를 30, 45MPa를 설정하였으며, NHT 대체율에 따른 역학적 특성을 평가하였다. 모든 시험체의 재령은 1, 3, 7, 28일로 설정하였으며, 측정하고자 하는 역학적 특성의 항목으로는 압축 강도, 초음파 속도 및 탄성계수로 설정하였다.

**Table 1.** Experimental plan

Contents	Details
Concrete	Plain concrete Non-sintered hwangto concrete
Replacement ratio of non-sintered hwangto	0, 15, 30%
Design compressive strength	30, 45MPa
Curing	1, 3, 7, 28 days
Mechanical properties	Compressive strength(MPa) Ultrasonic pulse velocity(km/s) Elastic modulus(GPa)

## 2.2 실험 재료

Table 2에는 본 연구에 사용된 재료의 물리적 특성을 나타냈다. 콘크리트 혼합된 시멘트의 경우 밀도 3.15g/cm<sup>3</sup> 및 분말도 3,200cm<sup>2</sup>/g인 1종 보통 포틀랜드시멘트를 혼합하였으며, 황토의 경우 밀도 2.5g/cm<sup>3</sup> 및 분말도 3,300cm<sup>2</sup>/g로서 비소성 상태로 설정된 비율만큼 시멘트를 대체하여 혼합하였다. Table 3에는 혼합된 시멘트 및 NHT의 화학적 요소를 정리하여 나타냈다. 혼합된 굵은 골재의 경우 부순 화강암계 골재로서 밀도 2.68g/cm<sup>3</sup>, 조립률 7.03, 흡수율 0.68% 및 최대 크기 20mm이다. 잔골재의 경우 밀도 2.54g/cm<sup>3</sup>, 조립률 2.54 및 흡수율 1.6%의 강모래를 혼합하였다. 목표 작업성을 맞추기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 혼합하였다.

**Table 2.** Physical properties of the materials

Materials		Properties
Binder	Cement	Type I ordinary Portland cement, Density : 3.15g/cm <sup>3</sup> , Fineness 3,200cm <sup>2</sup> /g
	Non-sintered hwangto	Density : 2.50g/cm <sup>3</sup> , Fineness 3,300cm <sup>2</sup> /g
Coarse aggregate	Crushed granite aggregate	Density : 2.68g/cm <sup>3</sup> , Fineness modulus : 7.03, Absorption : 0.68%, Maximum size : 20mm
Fine aggregate	River sand	Density : 2.54g/cm <sup>3</sup> , Fineness modulus : 2.54, Absorption : 1.6%
	Super plasticizer	Polycarboxylic-based acid

**Table 3.** Chemical properties of cement

Materials	Chemical Composition(%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
OPC <sup>1)</sup>	60.20	21.60	5.15	3.30	3.30	1.50	0.99	0.53
NHT <sup>2)</sup>	0.39	40.0	32.9	7.79	1.54	-	0.76	-

1) OPC: Ordinary Portland cement, 2) NHT: Non-sintered hwangto

## 2.3 실험 배합 및 방법

Table 4에 본 연구에서 수행한 콘크리트 배합을 나타냈다. NHT를 혼합하지 않은 PC의 경우 목표 강도를 30 및 45MPa로 설정하였다. 해당 목표 강도를 발현시키기 위해 PC의 W/B를 0.41 및 0.33으로 설정하였으며, 시멘트 대체 재료로서 NHT를 15 및 30% 치환할 경우 역학적 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 W/B는 동일하게 설정하였다.

본 연구의 측정 항목으로는 압축 강도, 초음파 속도 및 탄성계수로 설정하였으며, 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계 분

석을 통하여 초음파 속도 분석을 통한 PC 및 NHTC의 강도 예측식을 비교하여 나타냈다. 압축 강도의 경우 KS F 2405에 따라 측정하였으며, 탄성계수의 경우 KS F 2438에 준하여 측정하였다.

**Table 4.** Mix proportions of the plain concrete and non-sintered hwangto concrete

MIX ID	f <sub>ck</sub> (MPa)	W/B <sup>1)</sup>	S/a <sup>2)</sup> (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				
				W <sup>3)</sup>	C <sup>4)</sup>	NHT <sup>5)</sup>	S <sup>6)</sup>	G <sup>7)</sup>
PC30				165	400	0	799	956
NHTC30-15	30	0.41	46.0	165	340	60	794	950
NHTC30-30				165	280	120	788	943
PC45				165	500	0	711	961
NHTC45-15	45	0.33	43.0	165	425	75	705	953
NHTC45-30				165	350	750	699	944

1) W/B: Water/Binder; 2) S/a: Sand/aggregate; 3) W: Water; 4) C: Cement; 5) NHT: Non-sintered Hwangto; 6) S: Sand; 7) G: Gravel

Figure 3에 콘크리트 시험체의 초음파 속도 측정 방법을 나타냈으며, KS F 2731에 따라 측정하였다. 초음파 속도 측정기의 경우 Ultracon-170을 사용하였으며, 시험체와 탐촉자의 원활한 접촉을 위해 탐촉자 양단에 ‘Vacuum grease’를 도포한 후 측정하였다. 초음파 속도의 경우 다음과 같이 나타낸 식 (1)에 의해 계산되었다.



**Figure 3.** Ultrasonic pulse velocity test

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} \tag{1}$$

- V<sub>p</sub> : 속도(m/s)
- L : 이동 경로(m)
- Δt : 시간(sec.)

### 3. 실험 결과

#### 3.1 재령별 압축 강도

Figure 4에 PC 및 NHTC의 재령별 압축 강도를 나타냈다. Figure 4(a)에 목표 강도 30MPa에서의 압축 강도 결과를 나타냈으며, 모든 재령에서 NHT 치환율이 증가함에 따라 낮은 강도 발현을 보였다. NHTC30-15의 경우 PC30 대비 약 24.0%의 낮은 강도 발현을 보였으며, NHTC30-30의 경우 약 43.0%의 낮은 강도 발현을 보였다. Figure 4(b)에 목표 강도 45MPa에서의 압축 강도 결과를 나타냈으며, 시멘트를 NHT로 15% 대체할 경우 Figure 4(a)와 다르게 NHT를 혼합하지 않은 PC45와 유사한 강도 발현을 보였다. NHTC45-30의 경우 PC45 대비 약 28.0%의 낮은 강도 발현을 보였으며, 이는 Figure 4(a)에서 나타난 결과 대비 낮은 강도 차이를 보였다. NHT 대체율이 증가함에 따라 단위 시멘트량의 감소하여 낮은 강도 발현이 나타난 것으로 판단되며, 목표 강도가 높을수록 상대적으로 높은 단위 시멘트량의 영향으로 NHT 치환율 증가에 따라 작은 강도 차이를 보인다고 판단된다[15].

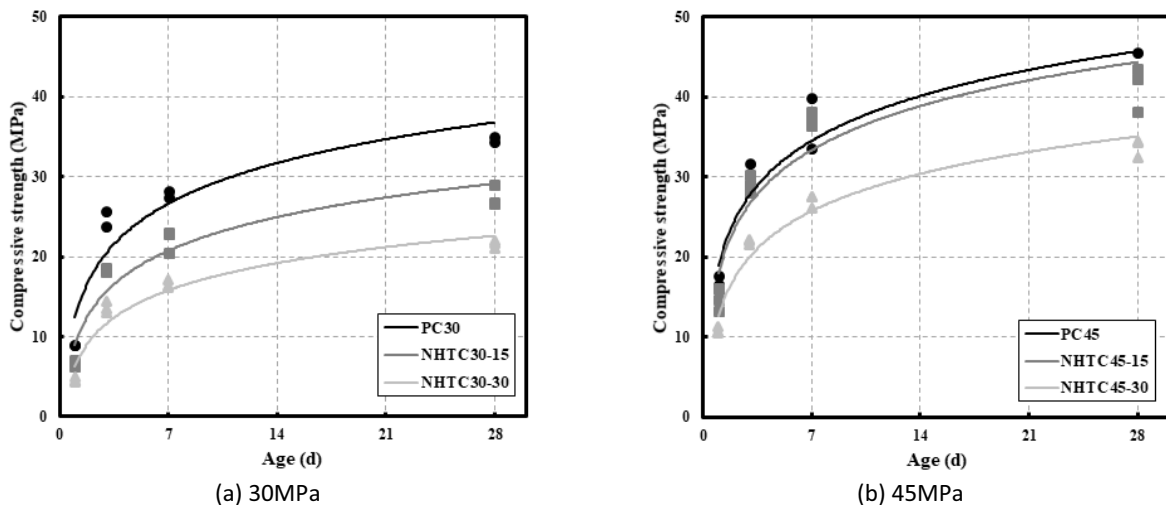


Figure 4. Compressive strength on plain concrete and non-sintered hwangto concrete

#### 3.2 재령별 초음파 속도

Figure 5에 PC 및 NHTC의 재령별 초음파 속도를 나타냈다. Figure 5(a)에 목표 강도 30MPa에서의 초음파 속도 결과를 나타냈으며, NHT 치환율이 증가함에 따라 낮은 초음파 속도를 보였다. NHTC30-15의 경우 PC30 대비 약 3.7% 낮은 초음파 속도로서 유사한 경향을 보였으며, NHTC30-30의 경우 약 11.18%의 낮은 초음파 속도를 보였다. NHT 치환율에 따른 초음파 속도 차이의 경우 압축 강도 대비 낮은 차이를 보였다. Figure 5(b)에 목표 강도 45MPa에서의 초음파 속도 결과를 나타냈으며, NHTC45-15의 경우 PC45 대비 약 2.6%의 낮은 초음파 속도를 보였으며, NHTC45-30은 약 6.24%의 낮은 초음파 속도를 보였다. 압축 강도와 유사하게 초음파 속도 또한 높은 목표 강도에서 상대적으로 NHT 치환율에 따라 작은 차이를 보였다. 초음파 속도의 경우 이전부터 시험체 내부 구조에 따른 영향이 보고되었으며, NHT를 혼합한 경우 높은 공극률 및 수축에 따른 콘크리트 내부의 공극 및 균열 증가가 초음파 속도에 부정적인 영향을 미쳤을 것으로 판단된다[16].

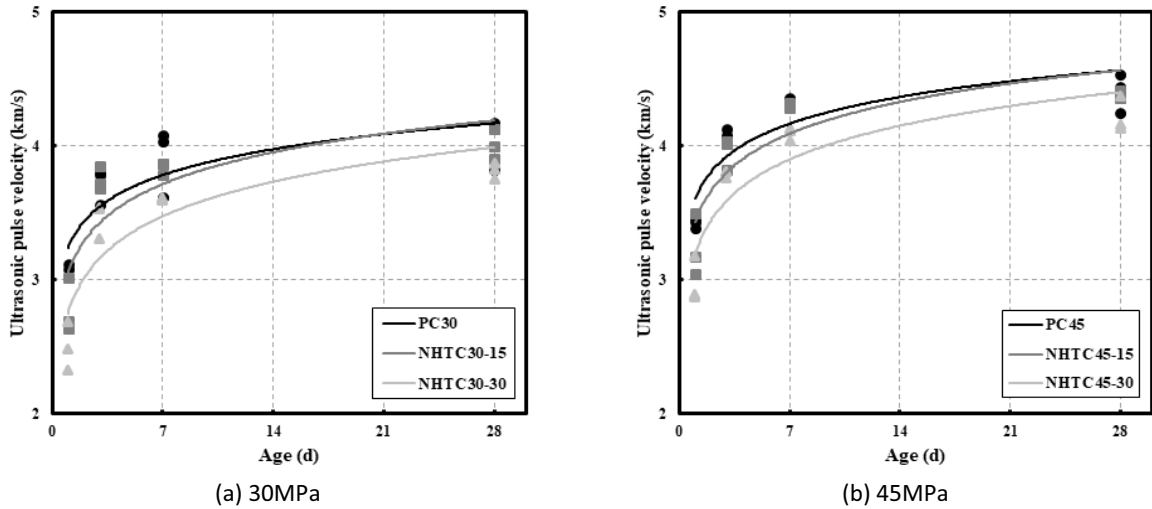


Figure 5. Ultrasonic pulse velocity on plain concrete and non-sintered hwangto concrete

### 3.3 재령별 탄성계수

Figure 6에 NC 및 NHTC의 재령별 탄성계수를 나타냈다. Figure 6(a)에 목표 강도 30MPa에서의 탄성계수 결과를 나타냈으며, NHT 치환율 증가에 따라 상대적으로 낮은 탄성계수를 보였다. NHTC30-15의 경우 PC30 대비 약 21.2%의 낮은 탄성계수를 보였으며, NHTC30-30의 경우 약 36.6%의 낮은 탄성계수를 보였다. NHT 치환율 증가에 따라 압축 강도 대비 낮은 차이를 보였으나, 초음파 속도 대비 높은 차이를 보였다. Figure 6(b)에 목표 강도 45MPa에서의 탄성계수 결과를 나타냈으며, NHTC45-15의 경우 PC45 대비 유사하거나 높은 결과를 보였다. 그러나, NHTC45-30의 경우 약 14.39%의 낮은 탄성계수를 보였다. 본 연구의 역학적 특성의 경우 목표 강도 45MPa에서 시멘트를 NHT로 15% 치환할 경우 PC와 유사한 경향을 보였으며, 구조적 안전성 측면에서 상대적으로 고강도 범위에서 NHT 활용이 적합하다고 판단된다.

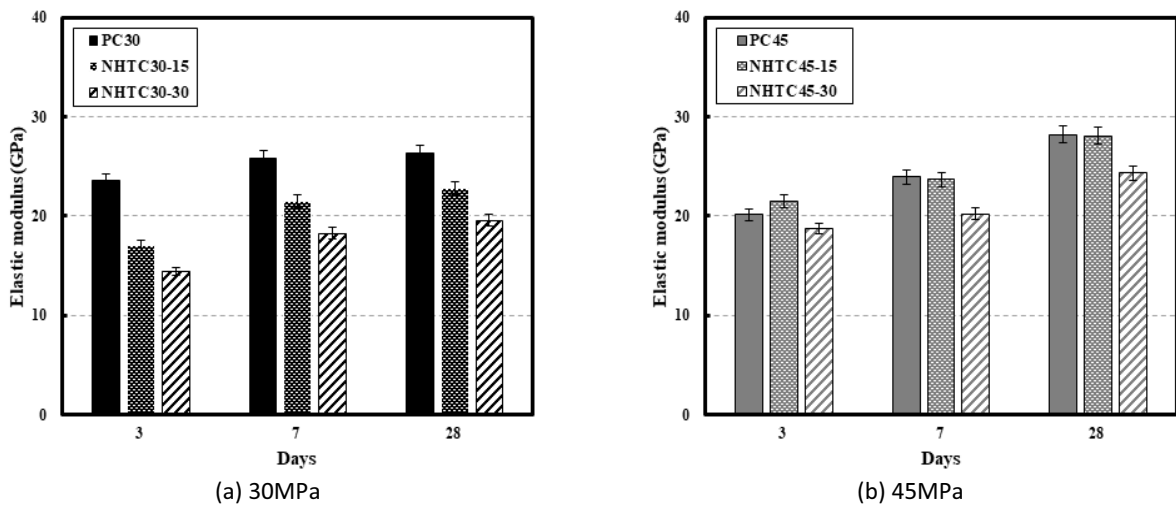


Figure 6. Elastic modulus on plain concrete and non-sintered hwangto concrete

### 3.4 압축 강도 및 초음파 속도의 상관관계 분석

Figure 7에 PC 및 NHTC에서 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계 분석 결과를 나타냈으며, 기존 제안된 강도 예측식과 비교하였다. 상관관계 분석 결과 지수 함수 형태가 적합하다고 판단되며, 기존 제안되었던 초음파 속도 분석을 통한 강도 예측식의 경우 지수 함수 형태가 상당수 보고되었다[17]. 상관계수(R<sup>2</sup>)의 경우 PC 및 NHTC 모두 0.92 및 0.95로서 높은 상관성을 보였으며, NHTC의 경우 상대적으로 낮은 압축 강도 및 초음파 속도의 영향 PC 대비 낮은 범위에서의 결과를 보였다. Rao et al.[14]의 경우 상대적으로 높은 강도 범위 결과의 영향으로 상회하는 경향을 보였으며, Sua-iam et al.[13]의 경우 강도 범위는 유사하였으나 상대적으로 낮은 초음파 속도를 나타냈기 때문에 상회하는 경향을 보였다. 그러나 Architectural Institute of Japan[10] 및 pyznsniak[11] 대비 높은 강도 범위의 영향으로 상회하는 경향을 보였으며, 상대적으로 낮은 초음파 속도 범위에서 강도 예측이 가능하다고 판단된다.

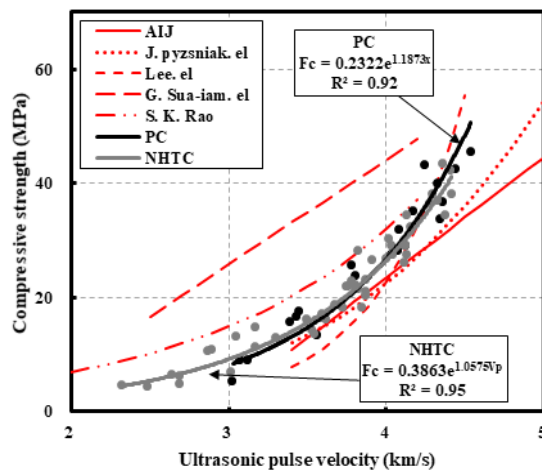


Figure 7. Correlation between plain concrete and non-sintered hwangto concrete

## 4. 결론

본 연구에서는 NHT를 혼합한 콘크리트의 재령 및 시멘트 치환율에 따라 역학적 특성을 평가하였으며 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계 분석을 수행하였다. 실험 결과, 압축 강도는 목표 강도 30MPa에서 NHT를 15% 및 30% 치환할 경우 약 24.0% 및 43.0% 낮게 발현하였으며, 목표 강도 40MPa에서는 NHT를 15% 치환할 경우 유사한 경향을 보였으나 30% 치환할 경우 약 28.0% 낮은 강도 발현을 보였다. 초음파 속도의 경우 목표 강도 30MPa에서 NHT를 15% 및 30% 치환할 경우 약 3.7% 및 11.8%, 목표 강도 40MPa에서는 NHT를 15% 및 30%를 치환할 경우 약 2.6% 및 6.2% 낮았다. 탄성계수의 경우 목표 강도 30MPa에서 NHT를 15% 및 30% 치환할 경우 약 21.2 및 36.6% 낮게 나타났으며, 목표 강도 40MPa에서는 15%를 치환할 경우 PC45와 유사한 경향을 보였다. 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계 분석 결과, R<sup>2</sup> 0.92 및 0.95를 갖는 지수 함수 형태의 강도 예측식이 도출되었다. 기존 제안된 식과의 분석 결과, 일반 콘크리트에서의 강도 예측식 대비 상회하는 경향을 보였으나, 혼화재를 혼합한 콘크리트의 강도 예측식 대비 하회하는 경향을 보였다.

## 요약

본 연구에서는 시멘트 대체 재료로서 비소성 황토(NHT)를 혼합한 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였으며, 초음파 속도


분석을 통한 콘크리트의 강도 예측식을 제안하였다. 혼합된 NHT의 시멘트 치환율을 0, 15 및 30%로 설정하였으며, 시멘트 및 NHT의 분체량에 대한 영향을 평가하기 위해 목표 강도를 30 및 45MPa로 설정하였다. 평가한 항목은 압축 강도, 초음파 속도 및 탄성계수로 설정하였으며, 재령 1, 3, 7 및 28일마다 설정한 항목을 측정하였다. 실험 결과, NHT 치환율이 증가함에 따라 역학적 특성은 감소하는 경향을 보였으며, 또한, 압축 강도와 초음파 속도의 상관관계 분석 결과 상관계수( $R^2$ )는 NHT를 혼합한 콘크리트의 경우 약 0.95로 높은 관계성을 보였다.

키워드 : 콘크리트, 비소성 황토, 압축 강도, 초음파 속도, 강도 예측 모델


## Funding


This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No.2022R1F1A1073333).

## ORCID

Jeong-Wook Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-1265-6061>

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

Gyu-Yong Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-8662-8899>

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

## References

1. Lee CY, Kim JH, Hyung WG. Properties of non-sintered cement mortar using non-activated hwangto. *Journal of Korea Society Waste Management*. 2019 Jan;36(1):82-7. <https://doi.org/10.9786/kswm.2019.36.1.82>
2. Malhotra VM. Introduction: Sustainable development and concrete technology. *Concrete International*. 2002 Jul;24(7):1-22.
3. Kim YH, Im JS, Yoo DH, Lee SJ, Bae JS, Son YM, Jeon HS, Lee DH. Intended national determined contribution (INDC) and longterm strategy for low GHG emission of major countries under the Paris agreement. *National Institute of Forest Science*. 2017 July;727:5-19.
4. Heo JO, Lee JK, Hyung WG. Properties of Non-sintered Hwangtoh Mortar Using Eco-Friendly Inorganic Binding Material. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2014 Aug;26(4):499-506. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.499>
5. Sung CY. Engineering Properties for Planting of Porous Concrete Block Containing Rice Straw Ash. 2004 Jun;16(3):311-8.
6. Kim JS. Experimental study on the mechanical properties and functionality of mortar using loess powder [master's thesis]. [DaeJeon (Korea)]: ChungNam National University; 2010. 1-5 p.
7. Kim BJ, Choi HB, Kang KI, Yi CK. Characteristics of natural loess (Hwangto) paste subjected to geopolymerization. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2011 Jan;23(1):121-7.
8. Park SJ, Kim JH, Hyung WG. A study on strength and durability of alkali activated slag mortar by replacement ratio on metakaolin. *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2015 Jan;32(1):70-7. <https://doi.org/10.9786/kswm.2015.32.1.70>
9. Lee SS. A study on the fluidity properties and strength properties of non-sintered hwangtoh mixed with PVA fiber. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2010 Jun;10(3):49-56. <https://doi.org/10.5345/JKIC.2010.10.3.049>
10. JASS 5. Japanese Architectural Standard Specification(JASS 5). Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2009:74-7.



11. Pyznsiak J. Method of concrete strength control, in prefabricated slabs. by ultrasound. *Build.Sci.* 1968 Jan;2(4):331-5. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(68\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0007-3628(68)90013-3)
12. Lee TG, Lee JH, Choi HG. Assessment of strength development at hardened stage on high-strength concrete using NDT. *Materials.* 2020 Sep;10(18):6261. <https://doi.org/10.3390/app10186261>
13. Sua-iam G, Sokrai P, Makul N. Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials.* 2016 Oct;125:1028-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.002>
14. Krishna Rao S, Sravana P, Chandrasekhara Raob T. Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology.* 2016 Jul;9(4):289-301. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>
15. Sung CY, Ryu NH, Youm JN. Physical and mechanical properties of mortar using non-active hwangto and stone dust. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers.* 2022 Nov;44(6):83-9.
16. Cho YH, Jung HY, Lee SS, Song HY. Engineering properties of mortar according to the replacement ratio of lime and the ratio between non-sintered hwangto and sand. 2008 Autumn Academic Presentation Conference;2008 Dec; Changwon, Korea. Jenju (Korea): The Regional Association of Architectural Institute of Korea; 2008. p. 919-24.
17. Demirboğa R, Türkmen I, Karakoc MB. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. *Cement and Concrete Research.* 2004 Dec;34(12):2329-36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>