

하중 이력에 따른 경량 잔골재 콘크리트의 초음파 특성

Ultrasonic Pulses Characteristics in Lightweight Fine Aggregate Concrete under Various Load Histories

유경석¹ · 김지상^{2*} · 김익범³

Kyung-Suk Yoo¹ · Jee-Sang Kim^{2*} · Ik-Beam Kim³

(Received September 12, 2014 / Revised September 22, 2014 / Accepted September 24, 2014)

One of the widely used NDT(Non-destructive techniques) is the ultrasonic pulse velocity (USPV) method, which determines the travel time of the ultrasonic pulse through the tested materials and most studies were focused on the results expressed in time domain. However, the signal of ultrasonic pulse in time domain can be transformed into frequency domain, through Fast fourier transform(FFT) to give more useful informations. This paper shows a comparison of changes in the pulse velocity and frequency domain signals of concrete for various load histories using lightweight fine aggregates. The strength prediction equation for normal concrete using USPV cannot be used to estimate lightweight fine aggregate concrete strength. The signals in frequency domain of ultrasonic pulse of lightweight fine aggregate concrete does not show any significant difference comparing with those of normal concrete. The increases in stress levels of concrete change the pulse velocities and maximum frequencies, however the apparent relationship between themselves can not be found in this experiment.

키워드 : 비파괴검사, 초음파펄스속도법, 경량 잔골재, 치환율

Keywords : Non Destructive Testing, Ultrasonic Pulse Velocity Method, Lightweight Fine Aggregates, Replacement Rate

1. 서론

콘크리트 구조물을 내부 손상 없이 평가하는 비파괴 시험은 노후 콘크리트 구조물의 상태조사 및 평가와 보수된 구조물의 성능 평가 및 확인에 대한 수요 증가에 따라 점차 발전해왔다. 널리 쓰이는 비파괴 시험 방법 중 하나로 콘크리트의 내부에 전혀 손상을 주지 않고 동일한 시편에 대한 시험을 반복적으로 오랜 기간에 걸쳐 수행할 수 있으며 내부 매질의 상태를 통해 역학적 특성을 평가할 수 있는 초음파 속도법이 있다. 초음파는 파동경로에 위치한 장애물에 의하여 전파에 방해를 받으며, 통과 매질의 재료 특성 및 미세 구조에 따라 특성이 변화하는 이 관계를 이용한 방법이 초음파 펄스 속도법(Ultrasonic pulse velocity method)이다

(Nagueire, C, 2009).

초음파를 활용하여 내부결함을 파악하려는 연구는 국내외에서 활발히 진행되고 있는데, Wu et al.(1998)은 반복하중을 받는 콘크리트 시편의 초음파 속도를 측정해 미세균열 발생과 함께 초음파 속도가 감소한다고 밝혔다. 또한 Stauffer et al.(2005)은 공진주파수와 초음파 속도 관계를 이용하여 콘크리트의 초기 손상을 측정하였고, Manish et al.(2006)은 인공신경망과 초음파 속도법을 이용한 압축강도 추정을 하였다. Harun Tanyidizi and Ahmet Coskun (2008)은 초음파 속도법을 이용하여 경량골재콘크리트의 압축강도와 초음파 속도의 매개변수 4가지인 골재의 최대 크기, 경화조건, 혼화제, 경화 시간을 인자로 사용하여, 초음파 펄스 속도와 압축 강도에 대한 매개 변수의 중요성을 Anova 분석법으로 결정하

* Corresponding author E-mail: zskim@skuniv.ac.kr

¹철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang Kyonggi-do 437-757, Korea)

²서경대학교 토목건축공학과 (Dept. of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea)

³서울연구원 안전환경연구실 위촉연구원 (Safety Environment Research Division, The Seoul Institute, Seoul 137-071, Korea)

였고, Greogor et. al.(2009)은 초음파 펄스 속도와 정적 및 동적 탄성계수와 전단 탄성계수 사이의 관계를 분석하여 초음파 속도와 압축강도 사이의 관계를 분석하여 기존식을 검증하였다. Treiber et al.(2010)은 실험과 시뮬레이션을 통해 잔골재의 양이 증가하면서 초음파 감쇠도 증가한다는 것을 밝혔으며, Bogas et. al.(2013)은 초음파속도법을 활용하여 경량골재콘크리트의 압축강도를 평가하여, 경량골재콘크리트의 초음파펄스속도법의 사용성을 확인하였다. 국내에서는 Cho(2008)가 콘크리트를 통과하는 초음파 속도에 재령이 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였고, Kim et al.(2007)은 부순 모래를 사용한 콘크리트의 강도를 초음파 속도법을 이용하여 추정하는 연구 결과를 발표하였다. Kim et al.(2010)은 하중 이력 상태에 따라 콘크리트의 내부결함이 진전되는 현상을 초음파 속도법을 이용하여 추정하는 연구를 수행하였고, Hong et al.(2012)은 초음파 속도법과 반발경도법 그리고 조합법을 이용한 기존의 콘크리트 강도 예측식을 비교 분석하였다. Kim et al.(2012)은 경량 골재 내부 공극의 수분이 콘크리트 내부에 시멘트 페이스트에 의한 화학수축의 공극을 채움으로서 수축을 저감시킬 수 있다고 판단하였고, Yang(2013)은 경량골재 콘크리트의 합리적인 배합설계 절차를 제시하기 위해 압축강도와 슬럼프 예측모델을 통해, 각 요소의 단위용적중량을 결정하기 위한 수학적 모델을 확립하였다. 전술한 것처럼 다양한 변수들에 대한 접근을 통한 초음파 속도법에 관한 실험 연구는 이루어졌으나, 대부분의 연구가 초음파 속도 변화를 이용한 강도 추정에 국한되어 있으며, 보통 골재 콘크리트만을 대상으로 연구가 진행되었고, 국내에서는 경량 골재 콘크리트 자체에 대한 연구만 있을 뿐, 경량 골재 콘크리트의 초음파 특성 분석이 아직 이루어지지 않은 실정이다.

이 연구는 하중의 크기가 변화할 때 경량 잔골재 콘크리트 시편을 통과하는 P파의 초음파 특성을 파악하여 주파수영역에서 최대 주파수를 구한 후 경량 골재 콘크리트에 있어서 초음파 특성을 구하였으며, 이에 따른 콘크리트 특성 변화 양상에 대한 예측을 시도하였다.

2. 실험 연구

2.1 초음파 속도 특성

2.1.1 초음파 속도

고체 매질이 진동에 의해 불안정해질 때 세 종류의 응력파가 발생하는데, 이 파들은 P파, S파 및 표면파로 구분한다. 이 세 가지 파는 음파가 공기 중에서 이동하는 것과 같은 방식으로 탄성체 내

에서 움직이며 P파가 가장 빠르고 표면파가 가장 느리며, S파는 P파와 표면파의 중간 속도이다. 무한하고 균질이며 등방성을 가진 전단 매질의 경우, P파와 S파의 속도는 식 (1)로 표현할 수 있다. 콘크리트는 불균질하고 비등방성 재료이므로 엄격한 의미에서 식 (1)을 적용하기에 곤란할 수 있으나, 파속은 재료의 강성에 더 크게 영향을 받고 탄성영역에서 적용하므로 콘크리트에 이 관계를 이용함에 있어 무리가 없다는 것이 알려져 있다(Maierhofer et al., 2010).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_0(1-\nu_0)}{\rho_0(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}} \quad (1)$$

여기서, V_p 는 P파의 속도(m/s), E_0 는 동탄성 계수(N/mm²), ν_0 는 프아송비, ρ_0 는 밀도(kg/m³)이다.

2.1.2 초음파 감쇠

초음파 감쇠란 Peak-to-peak 진폭이 줄어드는 현상을 뜻하며, Peak-to-peak 진폭이란 초음파의 양과 음의 최대값의 차이를 뜻한다. 콘크리트는 매우 복잡하고 이질적인 물질로 콘크리트의 단면은 다양한 크기와 형상을 가진 골재와 골재간의 틈을 매우고 있는 수화 시멘트 풀로 구성되어 있다. 거시적으로 볼 때 콘크리트는 시멘트 풀 매트릭스 속에 골재가 분산된 2상 재료이고, 미시적으로 볼 때 콘크리트 내부 구조를 구성하고 있는 두 요소는 서로 불균질하게 분포하고 있으며, 그 요소 자체도 불균질하다 (Mehta et al., 1986). 이 같은 특성 때문에 콘크리트를 통과하는 초음파는 이동경로에서 시멘트 매트릭스뿐 아니라 골재 및 균열과 같은 공동을 만나게 되고, 파동은 서로 다른 음향 임피던스를 가진 재료를 통과하면서 흡수 또는 산란되어 결과적으로 감쇠한다.

일반적으로 콘크리트의 굵은 골재 최대치수가 클수록, 다공질일수록 감쇠의 정도는 커진다. 콘크리트 시편에 하중이 증가함에 따라 파형의 Peak-to-peak amplitude가 감소함을 보인다.

2.1.3 주파수 영역 분석

푸리에 변환은 시간영역의 주기적인 파동운동의 정보를 주파수 영역으로 변환하여 파동 특성을 고찰할 수 있게 한 신호 해석 분야의 중요한 수학적 도구이다. 하중 재하 혹은 균열 여부에 따른 콘크리트 시편을 통과하는 주기적인 파동운동의 정보를 파악하기 위해 푸리에 변환을 이용할 수 있고, 이로부터 공간주파수 특성을 파악할 수 있다.

2.2 사용 재료

이 연구에서는 KS L 5201을 만족하는 1종 시멘트를 사용하고, 굵은 골재의 최대 치수는 15mm로 하여 잔골재와 혼입하여 사용하였다. 경량 골재의 경우, 독일 P사에서 유리 소성을 통해 제작된 인공경량 잔골재를 사용하였으며, 그 화학조성 및 물리적 성질은 다음과 같다(Table 1 참조).

Table 1. Properties of aggregates

	Gmax (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)
Fine Aggregate	-	2.57	1.1
Coarse Aggregate	15	2.72	0.51
LightWeight Aggregate (0.5~1mm)	1	0.47	30
LightWeight Aggregate (2~4mm)	4	0.32	15

2.3 배합비

이 연구에서는 경량골재의 치수와 치환율에 따라 총 5가지 배합을 하였다. 일반 잔골재(No)를 사용한 경우와 경량 잔골재의 치수가 0.5~1mm를 잔골재(L1) 부피비 50%와 100% 수준으로 치환하였다. 또한 경량 잔골재 치수가 2~4mm(L2)를 잔골재 부피비 50%로, 치수가 0.5~1mm인 경량 잔골재를 잔골재 부피비 50%, 치수

Table 2. Mix proportions of specimens

Specimens	Mix Proportions							
	W/C (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	L1 (kg)	L2 (kg)
N0*					772		0	0
L1-50**					386		70.6	0
L1-100***	39	47.3	183	461	0	910	141.2	0
L2-50****					386		0	48
LL-100*****					0		70.6	48

C=cement, G=coarse aggregate, S=fine aggregate, L1= lightweight fine aggregates of 0.5~1.0mm, L2= lightweight fine aggregates of 2.0~4.0mm

*NO is specimens without lightweight fine aggregates

**L1-50 is replacement ratio of fine aggregates is 50 % of 0.5-1.0mm

***L1-100 is replacement ratio of fine aggregates is 100 % of 0.5-1.0mm

****L2-50 is replacement ratio of fine aggregates is 50 % of 2.0-4.0mm

*****LL is replacement ratio of fine aggregates is 100% of 0.5 - 1.0mm and 2.0-4.0mm

가 2~4mm를 잔골재(LL) 부피비 50%로 잔골재를 전량 치환하였다. 실험에 사용한 5가지 배합비는 Table 2와 같다.

시편의 이름은 사용한 경량 잔골재의 종류와 치환율로 구분하여 표기하였다. 예를 들어, 골재 치수를 0.5~1mm인 경량 잔골재의 부피비 50%, 치수가 2~4mm인 경량 잔골재 부피비 50%로 치환한 배합의 세 번째 시편인 경우에 LL-100-3으로 표기한다.

2.4 실험 방법

2.4.1 시편 제작 및 양생

파동의 경로 길이와 진동수는 전달 시간에 영향을 미치지 않으므로 속도에는 영향을 미치지 않는다. 하지만 실험적으로 짧은 경로 길이는 약간 더 높은 초음파 속도가 나오는 경향이 있다. RILEM(1972) 기준에 따르면, 굵은 골재 최대치수가 30mm이하인 경우 지름이 100mm인 원주형 콘크리트 시편을 최소 시험체로 권장한다. 또한 이 기준은 측정단자의 고유진동수에 따라 일반적으로 적용할 수 있는 측정 길이의 범위와 최소 측정 길이를 제안하는데, 그 조건을 충족시키고 실험수행이 가능하도록, Fig. 1과 같이 150x90x150mm 직육면체 시편을 배합 당 5개씩 제작하였다. 제작한 시편은 상온에서 24시간 동안 양생한 후 탈형을 실시한 후, 28일 간 20°C의 항온 수조에서 수중 양생을 실시하였다.

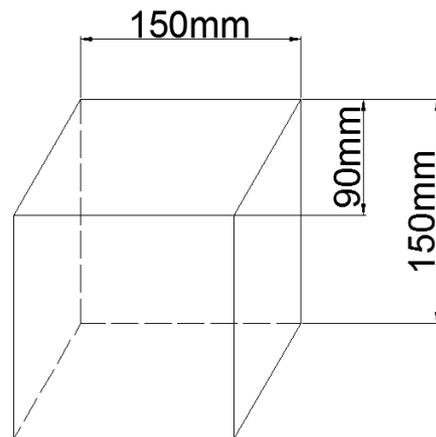


Fig. 1. Prismatic Specimen

2.4.2 강도 측정

시험체의 응력 증가에 따른 초음파 특성 변화를 고찰하기 위하여 최대용량 2,000kN의 UTM을 이용하여 1초당 1kN의 속도로 강도를 측정하였다.

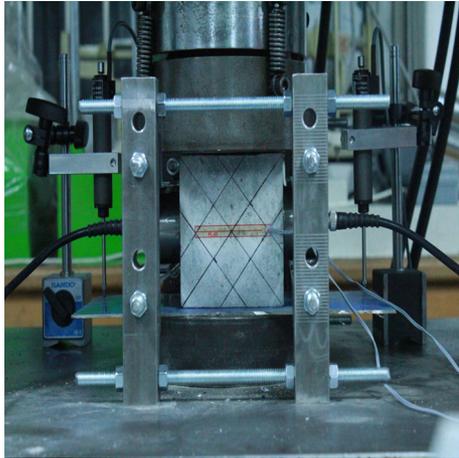


Photo 1. Test set-up

2.4.3 초음파 측정

초음파 측정에 사용한 발진자와 수신자는 직경 50mm, 고유진동수 54kHz P파 측정단자이며, 시편의 중앙에서 하중 재하 방향과 직교하는 방향의 초음파 특성을 측정하였다. 발진자를 떠난 초음파는 콘크리트를 통과하여 수신자로 도달하는데, 초음파 속도는 이 때 측정된 전달시간(T)과 발진자와 수신자 사이의 거리(L)를 이용하여 측정하였다(식 2).

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

초음파 전달시간은 저장된 파형을 이용해 Zero-crossing법으로 측정하였으며, 하중 재하 이전에 초기 초음파 전달시간을 통해 초음파 속도를 산정하고, 하중 재하 직후부터 시편의 파괴 시까지, 5초 당 1회씩 초음파 전달 시간과 초음파형을 오실로스코프로부터 실험용 PC로 송신받아 저장하였다. 시편과 측정단자의 부착면에는 접촉매질로써 초음파 접촉매질 도포제를 사용하여 실험의 정밀도를 향상시켰다(Photo 1 참조).

3. 결과 및 분석

3.1 초기 초음파 속도

3.1.1 초음파 속도

하중 재하전에 초기 초음파 속도를 계측하고, 배합 별 시편의 측정된 초음파 속도의 평균값을 Table 3에 나타냈다.

초음파 속도는 일반 잔골재를 사용했을 때보다, 경량 잔골재를

사용했을 때 감소하는 경향을 나타냈다.

3.1.2 초음파 속도법을 활용한 압축강도 추정

측정된 초기 초음파 속도를 활용하여 기존에 제시된 여러 가지 압축강도 추정 제안식을 비교분석하였다. 각 제안식들은 Table 4에 제시하였으며, 압축강도 추정값은 Table 5에 나타냈다.

전반적으로 초음파 전달속도가 빠를수록 압축강도가 큰 값을 가짐을 확인할 수 있어, 일반 콘크리트와 마찬가지로 초음파 전달속도와 압축강도는 비례관계를 가짐을 확인하였다. 압축강도 추정식의 오차는 강도수준별로 약간의 차이를 가졌는데, 상대적으로 강도가 적어질 경우에 대우건설 제안식의 신뢰도가 향상되었으며 강도가 커질 경우에 Gregor 제안식 의 신뢰도가 향상되었다. 또한

Table 3. Average ultrasonic velocity of specimens

Specimens	Average Ultrasonic Velocity (m/s)
N0	4671
L1-50	4051
L1-100	4351
L2-50	3916
LL-100	3430

Table 4. Strength estimation equation by ultrasonic pulse velocity method(Gregor Trtnik et al.(2009), Lim(2008))

	Strength estimation equation
Seoul Natl. Univ. (Eq.1)	$F_c = 326.7 * V_p - 1173$
Daewoo Const. Co. (Eq.2)	$F_c = 138.6 * V_p - 382.3$
Architectural Institute of Japan (eq.3)	$F_c = 215 * V_p - 620$
Tanikawa (Eq.4)	$F_c = 173 * V_p - 500$
Gregor Trtnik (Eq.5)	$F_c = 0.0854e^{(1.2882 * V_p)}$

Table 5. Average compressive strength and estimation compressive strength of specimens

Specimens	Average compressive strength (MPa)	Average estimation compressive strength (MPa)				
		Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.4	Eq.5
N0	36.24	35.32	26.52	38.44	30.82	35.08
L1-50	21.12	15.06	17.92	25.10	20.09	15.77
L1-100	21.63	24.84	22.07	31.54	25.27	23.20
L2-50	13.85	10.64	16.05	22.20	17.75	13.25
LL-100	9.17	x	9.32	11.76	9.35	7.09

전반적으로 Tanikawa 제안식과 Gregor 제안식이 실험값과의 오차가 낮았으며, 선형식보다 지수식인 Gregor 제안식의 오차가 적었다.

5개의 제안식들의 예상값과 실험값이 최대 42.9%까지 너무 큰 오차를 보이며 초음파속도법을 활용한 강도추정은 신뢰성이 낮은 것으로 판단된다.

3.2 강도

각각의 시편의 평균 압축강도를 Table 5로 정리하였다. 일반콘크리트에 비해 경량 잔골재를 치환한 콘크리트의 경우 파괴 강도가 낮게 측정되었다. 특히, 경량 잔골재 치수 0.5~1mm와 2~4mm로 잔골재를 전량 치환한 경우 일반콘크리트의 25% 정도의 강도를 나타냈다. 일반 콘크리트에 비해 경량 잔골재를 사용한 경우, 잔골재보다 경량 잔골재가 다공질의 골재이고 골재자체의 강도 또한 일반 골재보다 경량 골재가 낮아 일반콘크리트에 비해 경량 잔골재 콘크리트가 낮은 강도를 가지게 되었다.

3.3 하중 이력에 따른 초음파 속도 변화

파동의 경로에 위치한 점에서 하중 증가에 따라 생기는 균열 등 공극의 발생은 상대적으로 초음파의 이동 거리를 증가시키며, 초음파 속도는 하중을 받지 않은 상태보다 줄어든다. 일축압축하중을 받고 있는 각 시편의 초음파 속도의 변화는 Fig. 2에 보인 것과 같다. NO 시편의 평균 초기 속도는 4671m/s이고, 파괴 강도의 54%~57% 지점에서 속도가 급격히 하락하였다. 이는 콘크리트의 초음파 속도 측정 시 발생하는 일반적인 현상으로 속도가 급격히 감소하는 순간에 내부에 균열이 발생하여 생기는 것이다. L1-50 시편의 평균 초기 속도는 4051m/s이며 파괴 강도의 57%~88%에서 속도의 급격한 하락이 있었다. L1-100 시편은 4351m/s

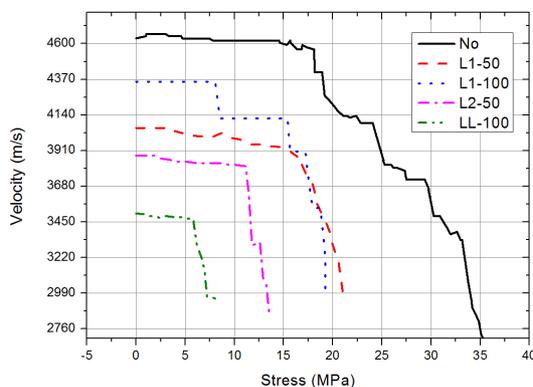


Fig. 2. Ultrasonic pulse velocities change due to increase stress

의 평균 초기 속도를 보이며, 1번 시편이 파괴강도의 45%에서 속도의 하락하는 양상을 보이다가 다시 속도를 유지하여 76% 부근에서 다시 급격한 하락세를 보였고, 2번과 3번 시편은 76%, 78% 부근에서 급격한 하락을 보여 파괴강도의 평균 77% 부근에서 균열이 크게 진행했음을 알 수 있다. L2-50 시편은 3916m/s의 평균 초기 초음파 속도를 보였고 67%~84% 부근에서 급격한 하락이 발생했다. LL-50시편의 경우 평균 초기 초음파 속도는 3430m/s이고 2번과 3번 시편의 경우 평균 69%에서 거시적인 균열이 발생하였으며, 1번 시편의 경우 파괴 시까지 거의 변화를 보이지 않았다. 초음파 속도가 변화하지 않은 이유는 시편의 균열 지점이 파동의 이동 경로 상에 위치하지 않았기 때문이라 판단된다.

경량 골재 콘크리트의 경우, 초음파 속도의 급격한 하락은 파괴 강도 60% 이하의 구역에서 일어난 1개의 시편과 변화 구간을 보이지 않은 1개의 시편을 제외한 모든 시편이 파괴강도 66%에서 88% 구간에서 나타났다. 사용 재료에 따라 비교해보면 일반 골재를 사용했을 때보다 경량 골재의 사용했을 때, 초음파 속도가 빠르며 이는 경량 골재에 비해 일반 골재가 강도가 높고 더 밀실하기 때문이다. 그리고 경량 골재 치환율에 따라 분석해보면 L1-100 시편은 L1-50보다 초음파 속도가 빠르며 이 또한 L1-100이 L1-50보다 강도가 높기 때문이다. 한 가지 경량 골재를 사용할 때와 두 가지 경량 골재를 혼입하여 사용한 경우를 비교해보면, 한 가지 경량 골재를 사용한 경우가 두 가지를 혼입한 경우보다 초음파 속도가 빠르며 강도 또한 높았다(Table 3 참조).

이 실험을 통해 콘크리트 시험체 내부의 응력수준 증가에 따라 초음파 속도가 균열이 발생하는 구간에서 급격히 하락한다는 것과 보통 콘크리트보다 경량 골재 콘크리트의 초음파 속도가 작은 값을 알 수 있었고, 경량 골재 치환율과 경량 골재 치수가 증가할수록 초음파 속도가 감소하는 것을 확인하였다.

3.4 최대 주파수 분석

Fig. 3은 FFT를 사용하여 시간영역 주파수를 주파수 영역으로 변환한 일반적인 결과이며, 하중이 증가함에 따라 주파수 변화는 거의 발견 할 수 없었으나, 주파수의 상대적인 크기(Magnitude)는 변화하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 배합비 별 응력 변화에 따른 초음파 펄스 속도와 최대 주파수의 상대값을 나타낸 그래프이다.

각 그래프의 변화를 살펴보면 초음파 속도는 대체로 내부균열 발생하는 구간에서 불연속적으로 급격히 감소하고 최대 주파수는 각각의 차이는 있었지만, 응력수준의 증가와 대체로 비슷한 경향

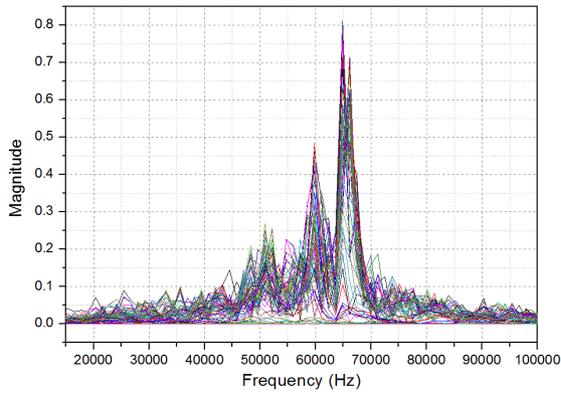
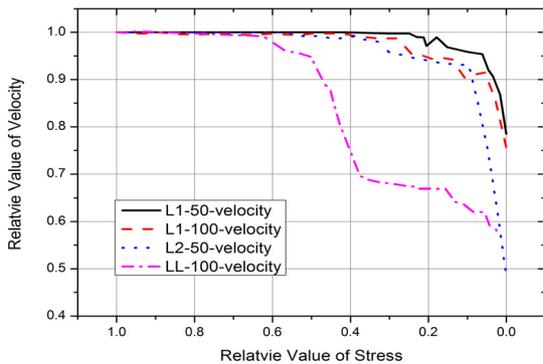
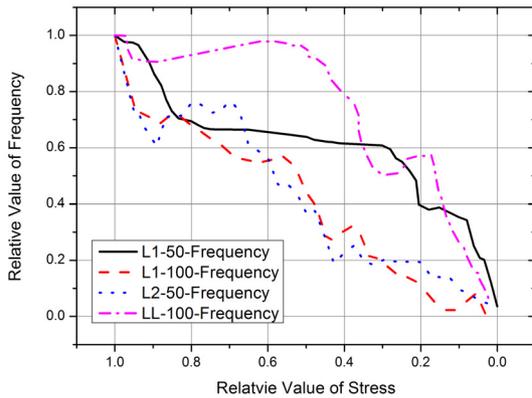


Fig. 3. Stress according to frequency



(a) Ultrasonic velocity



(b) Peak frequencies

Fig. 4. Ultrasonic pulse velocities and peak frequencies for increasing stress levels

으로 연속적으로 감소한다. 특히, L1-50과 L2-50 시편은 파동의 이동경로와 균열 지점의 불일치와 같은 내적 요인과 시편과 측정 단자 간의 접촉 불량이나 실험 환경 상에서 발생하는 진동과 같은 외적 요인에도 응력의 상승에 따른 초음파 속도와 최대주파수의 감소경향을 나타냈다.

이 결과로 응력 수준의 증가에 따라 내부 균열이 발생하여 초음파 속도가 느려지고 최대주파수 또한 응력의 증가에 따라 감소함을 확인하였다. 또한 최대주파수와 초음파 속도는 각각의 변화가 상대에 영향을 미치지 않은 상호 독립적인 관계임을 확인하였다.

4. 결론

이 연구에서는 보통콘크리트와 경량 골재 콘크리트의 P파 초음파 속도를 측정하고, 초음파 속도를 활용한 압축강도 추정식을 활용하여 압축강도를 추정하였으며, 실험값과 예상값을 비교하였다. 또한 하중이력 상태에서 측정된 초음파의 형태를 FFT를 이용하여 주파수 영역에서 분석하여 콘크리트의 상태를 평가한 연구로서, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초음파 속도와 콘크리트의 압축강도는 비례 관계를 가지므로 판단되나, 초음파 속도법을 활용하여 압축강도를 추정해 본 결과 실험값과 추정값이 최대 42.9%의 오차범위를 나타내고 있어 초음파 속도법을 활용한 강도측정 제안식은 신뢰성이 낮다고 판단된다.
2. 콘크리트의 강도는 일반콘크리트에 비해 경량 잔골재를 사용한 콘크리트의 강도가 낮게 측정되었는데, 골재 자체의 강도가 일반 골재보다 경량 잔골재가 낮고 공극이 많아 콘크리트 자체 내부 공극이 많아 강도가 낮게 측정되었다고 사료된다.
3. 콘크리트의 초음파 속도는 하중이 증가함에 따라 균열의 발생으로 속도가 감소함을 확인했다. 시편의 균열 발생 지점 및 초음파 속도의 급격한 저하지점은 파괴강도의 57%에서 88%까지 응력 수준 구간에서 나타났다.
4. 경량 골재의 사용유무와 경량 골재의 치환율의 차이, 경량 골재 치수 차이에 따라 초음파 속도와 최대 주파수의 차이가 발생하는데, 초음파 속도의 차이와 최대 주파수 차이는 재료별 파괴 강도의 차이와 상관관계를 가짐을 확인했다. 그러나, 초음파 속도와 최대 주파수 간에 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.
5. 일반 콘크리트의 초음파 속도법을 활용한 강도 추정식을 경량 잔골재의 강도 추정식으로 활용하기에는 신뢰도가 너무 낮음을 확인하였으므로, 추후 경량 잔골재에 적합한 초음파 속도법을 활용한 강도 추정식을 제안하고, 최대 주파수의 감소 추세와 응력 수준의 증가 경향이 유사하다는 사실에 기인하여 초음파 속도법을 활용한 최대 주파수의 감소 경향과 콘크리트 시편의 역학적 관계를 파악하기 위해 진폭과 최대 주파수 간

의 관계를 정립할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 일반연구지원사업의 초음파펄스 속도법을 이용한 콘크리트의 역학적 특성 평가 연구 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, Chang-Ho. (2008). Calculation of Aging Effects of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete by Non-Destructive Test. Korea institute for Structural Maintenance Inspection Journal, **12(6)**, 173-179 [in Korean].
- Gregor Trtnik., Franci Kavc̃ic̃, and Goran Turk. (2009). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. Ultrasonics, **49**, 53-60.
- Harun Tanyidizi and Ahmet Coskun. (2008). Determination of the Principal Parameter of Ultrasonic Pulse Velocity and Compressive strength of Lightweight Concrete by Using Variance Method. Russian Journal of Nondestructive Testing, **44(9)**, 639-646.
- Hong Ki Nam., Lee Han Sol., Kim Joon Il., Han Sang Hoon, and Jung Gyu San. (2012). Estimation of concrete Compressive Strength by Non-Destructive Test. Journal of the Institute of Construction Technology, **31(2)**, 19-25 [in Korean].
- J. Alexandre Bogas., M. Gloria Gomes, and Augusto Gomes.(2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. Ultrasonics, **53**, 962-972.
- Kim, J.H., Kim, J.S. and Park, J.B., (2010). Internal Damage Assessment of Concrete for Various Load Histories using Ultrasonic Pulse Velocity Method. Proceedings of Korea Concrete institute 2010 Spring Convention, **22(1)**, 347-348 [in Korean].
- Kim, Joo Hyung., Choi, Young Cheol., Jung, Sang Hwa, and Lee, Kwang Myong. (2012). Mixing and Shrinkate Properties of internal curing concrete by lightweight fine aggregate. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute 2012 fall, **12(2)**, 177-189 [in Korean].
- Kim, M.S., Baek, D.I. and Youm, C.S. (2007) A Study on the Strength Prediction of Crushed Sand Concrete by Ultra-sonic Velocity Method. Korea institute for Structural Maintenance Inspection Journal, **11(4)**, 71-78 [in Korean].
- Lim, Su-Young. (2008). A Study on the Estimation of Compressive Strength of Concrete by Non-Destructive Test. Daegu University, Korea [In Korean].
- Manish A. Kewalramani, and Rajiv Gupta. (2006) Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. Automation in Construction, **15**, 374-379.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1986). Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill, U.S.A.
- Nagueire, C. (2009). Ultrasonic wave propagation in concrete. VDM-verlag, U.S.A.
- RILEM Recommendation NDT 1. (1972). Testing of Concrete by the Ultrasonic Pulse Method. Paris.
- Stauffer, J.D., Woodward, C.B. and White, K.R. (2005). Nonlinear ultrasonic testing with resonant and pulse velocity parameters for early damage in concrete. ACI Materials Journal, **102(2)**, 21-28.
- Treiber, M., Kim, J., Qu, J. and Jacobs, L.J. (2010). Effects of sand aggregate on ultrasonic attenuation in cement-based materials. Materials and Structures, **43(1)**, 1-11.
- Wu, T.T. and Lin, T.F. (1998). The stress effect on the ultrasonic velocity variations of concrete under repeated loading. ACI Materials Journal, **95(5)**, 519-524.
- Yang, Keun-Hyeok. (2013). Mix Design of Lightweight Aggregate Concrete and Determination of Targeted Dry Density of Concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction, **13(5)**, 491-497 [in Korean].

하중 이력에 따른 경량 잔골재 콘크리트의 초음파 특성

본 연구는 비파괴 검사 중 하나인 초음파 펄스 속도법(Ultrasonic Pulse Velocity Method)은 시험 물질의 초음파 펄스의 이동 시간을 결정하는 것으로, 지금까지 대부분의 연구는 시간 영역에서 표현된 결과만을 이용하여왔다. 그러나 시간 영역에서 초음파 펄스의 신호는 고속 푸리에 변환(FFT)를 통해 주파수 영역으로 변환할 수 있으며, 보다 유용한 정보를 얻을 수 있어, 그 방법을 활용하고자 한다. 이 논문에서는 경량 잔골재를 사용하여 다양한 하중 이력에 대한 콘크리트의 펄스 속도와 주파수 영역 신호의 변화에 대한 비교를 통해, 일반 콘크리트의 강도식의 적용성 여부, 골재 치환율 별 주파수 변화 양상, 최대주파수 분석 등의 연구를 진행하였다. 초음파 속도 측정과 강도 측정을 통해 경량 잔골재 콘크리트에 기존 압축강도식의 적용성 여부를 판단하였지만, 신뢰도 저하로 기존 제안식의 사용은 어렵다는 것을 확인하였고, 하중이력 상태에서 경량 잔골재를 사용한 콘크리트의 초음파 펄스가 주파수 영역에서 보이는 신호가 보통 콘크리트와 비교하여 차이를 보여주지 않았으며, 응력 증가 추세에 따라 초음파 속도와 최대주파수의 상관관계는 존재하나, 초음파 속도와 최대주파수는 상호 독립적인 관계임을 확인하였다.