

콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구

A Study on Factors Influencing P-wave Velocity of Concrete

이 광 명* 이 회 근** 김 동 수*** 김 지 상****
Lee, Kwang-Myong Lee, Hoi-Keun Kim, Dong-Soo Kim, Ji-Sang

ABSTRACT

Recently, non-destructive tests are getting popular in evaluating concrete properties without breaking specimens. Among several NDT methods, P-wave velocity measurement technique has been widely used to evaluate the stiffness and strength of concrete. The purpose of this study is to investigate factors influencing P-wave velocity measured by impact-resonant method and ultrasonic pulse velocity method, such as moisture content of concrete, existence and size of coarse aggregates, sensor and sampling rate. Test results show that rod-wave velocity measured by impact-resonant method and ultrasonic pulse velocity are significantly affected by the moisture content of concrete, i.e., the lower moisture content, the lower velocity. Moisture content influences rod-wave velocity stronger than ultrasonic pulse velocity. Rod-wave velocity is faster in concrete than in mortar and is also faster in concrete containing small size aggregates. Sensor and sampling rate have little influence on velocity.

1. 서론

현재 사용중인 콘크리트 구조물은 세월이 지나면서 다양한 기상작용과 구조물이 위치해 있는 환경적 변화의 영향으로 콘크리트의 성능에 제한을 받게 되며, 때로는 구조물의 본래 의도되어진 기능을 상실할 수도 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 상태를 정확히 진단하여 구조물을 관리하는 것이 중요하고 구조물의 성능을 비파괴적으로 평가할 수 있는 방법의 필요성이 날로 증가하고 있다. 최근들어 용력파의 전파속도를 이용하여 콘크리트의 강도와 강성의 결정, 균열 및 공동탐사, 결합탐지 등에 사용되는 비파괴검사에 대한 연구와 적용이 활발히 이루어지고 있다^(1,2,3). 그러나 콘크리트의 P파 속도와 강도가 높은 상관관계를 갖기 위해서는 먼저 콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 여러 가지 인자들에 대한 이해가 필수적이며 이에 대한 연구가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 실험을 통해 콘크리트의 수분함유량이 P파 속도에 미치는 영향정도를 정량적으로 알아보고 이밖에 골재의 유무와 크기, 그리고 신호 처리 및 분석 방법과 측정장비 등이 P파 속도에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 이론 배경

2.1 콘크리트의 P파 속도에 영향을 미치는 인자

콘크리트의 P파 속도는 탄성계수와 같은 콘크리트의 재료 성질과 상관성이 있기 때문에 서로 다른 구성 성분을 가진 콘크리트의 P파 속도는 각각 다르다. 또한 콘크리트의 재료 성질은 정확한 속도의 측정을 통해서 역으로 계산될 수 있다. 그러나 P파 속도는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받기 때문

*정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

**정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

***한국과학기술원 토목공학과 부교수

****한국통신 가입자망 연구소 선임연구원

에 P파 속도와 강도가 높은 상관관계를 갖기에는 다소 어려움이 있다. P파 속도는 콘크리트의 수분함유량이 많아지면 증가하지만 건조해지면 감소하는 경향이 있다⁽⁴⁾. 또한 초음파법에 의해 측정된 P파 속도가 충격공진법에 의해 측정된 막대파 속도보다 더 크다. 그리고 P파 속도는 센서의 종류나 sampling rate, FFT 등과 같은 신호 처리 및 분석 방법, 측정장비에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 또한 P파 속도는 콘크리트의 수분함유량, 온도, 시편의 크기 등에 의해 영향을 받기 때문에 강도와의 정확한 상관관계를 설정하기가 어렵다.

2.2 충격공진법

시험 대상체에 충격을 가하면 구형의 파면 형태로 매질 속으로 전파하는 체적파인 종파(P)와 횡파(S), 그리고 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파(R)가 발생한다. 체적파는 전파하는 도중에 내부 결합이나 경계면을 만나면 파의 진행 방향을 바꾸어 시험 대상체의 상부 표면으로 전파하며 이렇게 반사된 파는 상부 표면에서 다시 반사되어 매질 속으로 전파하게 된다. 그래서 상부 표면과 내부 결합 또는 경계면 사이에서의 다중반사에 의해 공진상태가 유발된다⁽⁵⁾. 이때 체적파가 되돌아 오는 시간 Δt 가 탄성파의 진동 주기 T에 정수배가 될 경우에는 진폭이 커지고 그렇지 못할 경우에는 진폭이 작아지게 된다. 따라서 공진이 일어날 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta t = nT = \frac{n}{f_n}, \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

만일 측방향 변위가 허용되는 공시체와 같은 형태의 매질을 따라 전파하는 경우에는 파가 한번 왕복한 이동경로는 시험체 두께(d)의 2배이므로 막대파 속도(rod wave velocity), V_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c = \frac{2d}{\Delta t} \quad (2)$$

충격공진법에서는 기본 공진 모드를 이용하기 때문에 식 (1)에서 $n=1$ 일 때 $\Delta t=1/f_1$ 이다. 따라서, 식(2)로부터 막대파 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c = 2df_1 \quad (3)$$

막대파에 의한 공진주파수는 시간영역에서의 변위 파형을 FFT를 통해 주파수영역으로 변환시켜 결정되며, 막대파 속도를 결정하기 위해서는 시험 대상체의 두께를 미리 알고 있어야만 한다.

2.3 초음파법

모든 파는 매질의 밀도에 따라 그 전달속도가 다르다는 원리를 이용한 방법으로써 콘크리트 표면에 위치한 발진자에서 발신된 초음파가 콘크리트 매질을 통해 인접한 수신자로 되돌아오는 시간을 측정함으로써 초음파속도, 즉 P파 속도를 측정하는 방법이다. 발진자와 수신자의 배치방법으로는 직접전달법, 반간접전달법, 표면전달법이 있다⁽⁶⁾.

3. 실험개요

3.1 재료 및 배합비

굵은 골재로는 최대치수가 15 mm와 25 mm인 두종류 크기의 화강암이, 잔골재는 표준모래를 각각 깨끗한 물로 씻어서 불순물을 제거하여 사용되었다. Table 1의 배합비를 사용하여 원통형 공시체($\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)가 제작되었다. 배합비에서 굵은 골재의 양을 제외한 것이 모르타르 배합비(M1, M2, M3)이다. 공시체 타설 직후 24시간 동안은 항온항습실($21 \pm 2^\circ \text{C}$, $50 \pm 5\%$)에서 양생되었으며, 이후 몰드에서 꺼내져 실험전까지 수중에서 표준양생되었다.

3.2 실험장비

충격공진법을 이용한 콘크리트 공시체의 막대파 속도 측정에는 휴대용 노트북에 파형 수신용 카드가 장착된 충격공진 시험장비가 사용되었다. 충격발생은 강철구가 사용되었으며 이로 인해 발생한 탄성파의 검출은 원추형 압전 탐촉자와 가속도계(Model PCB 353B15)가 사용되었다. 또한 충격원이나 시험체에 따라서 진동 신호의 크기가 달라질 수 있으므로 외부에 진척 증폭기를 부착하여 원하는 크

기의 신호를 얻었으며 주위의 잡음 신호를 배제하기 위해 필터가 사용되었다. 초음파 속도의 측정에는 Proceq사 제품의 초음파 측정기(Model TICO)가 사용되었으며 탐촉자의 사용주파수는 54 kHz이었다.

3.3 실험방법

3.3.1 골재의 유무와 크기에 따른 막대파 속도 실험

골재의 유무에 따른 막대파 속도의 차이를 알아보기 위한 실험에는 C2과 M2, C3와 M3의 배합비가 각각 사용되었으며, 막대파 속도의 측정에는 재령별(1,3,7,14,28일)로 수행되었다. 골재의 크기에 따른 막대파 속도 실험에는 두 종류 크기의 굵은 골재가 사용되었으며 배합비는 C3가 사용되었다. 막대파 속도의 측정에는 재령별(1, 3, 7, 28일)로 수행되었으며, 공시체는 실험전 양생조에서 꺼내어 3시간 동안 항온항습실에서 건조시킨 다음 속도가 측정되었다.

3.3.2 센서의 종류와 sampling rate에 따른 막대파 속도 실험

재령이 상당히 경과한 C1으로부터 제작된 서로 다른 두 개의 공시체를 충분히 자연 건조시킨 후 두 종류의 센서와 sampling rate를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 충격공진 실험시 다른 모드 성분을 배제하고 깨끗한 신호를 얻기 위해 강철구가 공시체의 중앙에 자유낙하 되었으며 센서는 충격 발생원과 가까운 곳에 위치하였다. 충격으로 인해 발생한 응력파의 수신을 좋게 하기 위해 공시체의 표면과 센서 사이에 젤 타입의 접착시약(커플런트)이 사용되었다.

3.3.3 콘크리트의 수분함유양에 따른 막대파와 초음파 속도 실험

재령에 대한 영향을 최소화하여 단지 수분함유양에 따른 막대파와 초음파 속도의 변화정도를 알아보기 위해 강성의 변화가 거의 없을 것으로 예상되는 재령이 5개월 이상된 C1 공시체를 실험 대상으로 하였다. 건조 방법에 따라 두 가지의 실험이 수행되었는데, 건조기(oven)를 사용하여 공시체의 수분을 감소시키는 방법과 항온항습기를 사용하여 건조시키는 방법으로 실험이 수행되었다. 먼저 공시체의 수분감소량을 알아보기 위해 양생조에서 꺼낸 공시체 표면의 물기를 마른수건으로 잘 닦은 후 물로 완전히 포화된 공시체의 무게를 측정하여 수분함유양의 기준으로 삼았다. 이후 충격공진 시험기와 초음파 속도 측정기를 사용하여 막대파 속도와 초음파 속도를 각각 측정한 후 건조기와 항온항습기를 이용하여 공시체를 건조시켜 가면서 수분양 감소에 따른 속도 측정을 반복 수행하였다. FFT를 위한 데이터 사이의 시간간격(Δt)은 $8 \mu s$ (125 kHz)이며 데이터 개수는 4096개로 하였다. 건조기를 사용하여 건조시킨 공시체는 건조후 항온항습기에서 충분히 식힌 다음 속도 측정을 하였으며 측정시 공시체의 온도는 $20 \pm 1^\circ C$ 로 유지하였다.

Table 1. Mix proportion of three concrete mixtures (kg/m^3)

Type	Cement	SF (%)	Coarse Agg.	Fine Agg.	Water	HRWR/(C+SF)(%)	S/a (%)	AE WR/C (%)	Max. Agg. size (mm)	W/(C+SF) (%)
C1	400	-	1032.0	691.0	185	-	41	0.2	25	0.46
C2	400	-	988.3	702.2	200	-	42	-	15	0.50
C3	475	25	1040.2	680.4	165	1.5	40	-	15, 25	0.33

4. 실험결과 및 분석

콘크리트 배합 C1, C2, C3의 재령 28일 압축강도는 각각 34.5 MPa, 37.2 MPa, 57.3MPa이었다. 골재의 유무에 따른 재령별 막대파 속도의 변화를 Fig. 1에, 골재의 크기에 따른 재령별 막대파 속도의 변화를 Fig. 2에 각각 나타내었다. 서로 다른 공시체에 대한 센서의 종류와 sampling rate에 따른 충격공진 실험결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 Fig. 3와 Fig. 4에는 수분 감소율에 따른 막대파 속도와 초음파 속도의 변화를 무차원으로 나타내었다.

4.1 골재의 유무, 골재 크기와 막대파 속도

Fig. 1의 (a)와 (b)를 보면 막대파 속도는 재령이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 모르타르에서보다 콘크리트에서 더 크게 나타났다. 또한 모르타르와 콘크리트에서의 막대파 속도 차이가 재령 초기에는 약 17~19 %정도로 크게 나타난 반면에 재령이 경과함에 따라 그 차이는 약 4~5% 정도로 줄어들었다. Fig. 2를 보면 15 mm 골재가 사용된 콘크리트에서의 막대파 속도가 25 mm 골재가 사용된 콘크리트의 막대파 속도보다 약 1.0~1.5 %정도 크게 나타났으며 압축강도 또한 약 8~10 % 정도 크게 나타났다. 따라서 막대파 속도는 강도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

4.2 센서의 종류, sampling rate와 막대파 속도

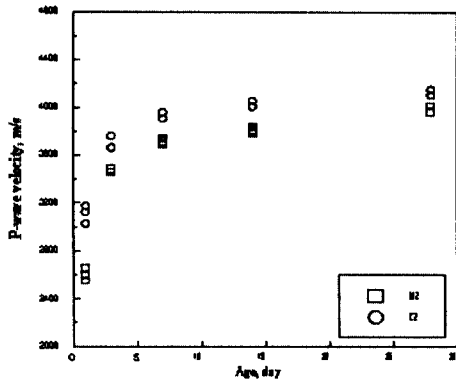
Table 2로부터 동일한 조건에서 원추형 탐촉자와 가속도계를 사용하여 충격공진 실험으로부터 얻은 주파수는 원추형 탐촉자가 가속도계보다 약간 크거나 동일한 측정값을 보였다. 따라서 센서의 차이는 막대파 속도에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. Sampling rate에 따른 주파수는 sampling rate가 증가함에 따라 주파수가 약간의 차이를 보이며 다소 증가하는 경향을 나타내었으며 이후에는 어느 하나의 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 이밖에 충격공진 실험시 강철구의 접촉시간이 의미를 가지는데 이는 충격발생원으로 사용된 강철구의 직경과 선형적인 관계가 있다. 즉 직경이 큰 강철구를 사용하면 접촉시간이 길어져 주파수 범위가 낮아지기 때문에 작은 결함을 탐지하는데 민감하지 못하다. 막대파 속도를 이용한 강도평가에는 강철구의 크기가 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

4.3 콘크리트의 수분함유양에 따른 막대파 속도와 초음파 속도

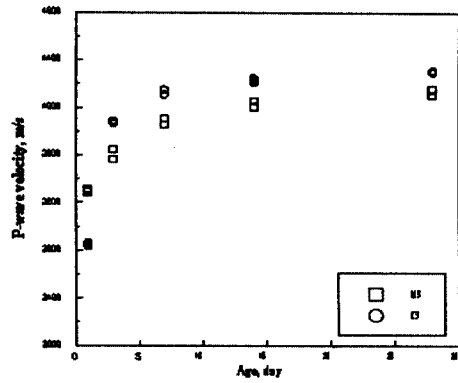
Fig. 3를 보면 공시체의 수분함유율이 약 2.3~2.5 % 정도까지 감소함에 따라 막대파 속도와 초음파 속도가 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 막대파 속도는 전체 약 5 %정도의 속도 감소율을 보인 반면에 초음파 속도는 3 %정도의 속도 감소율을 나타내고 있다. 이로부터 막대파 속도가 초음파 속도보다 수분의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. Fig. 4을 보면 Fig. 3와 마찬가지로의 경향을 나타내었다. 그러나 같은 1 %의 수분감소율에서 항온항습기를 사용하여 건조시킨 공시체의 속도감소율은 약 2.7 % 정도인데 반해 건조기를 사용하여 건조시킨 공시체의 속도감소율은 약 1 % 정도로 나타났다. 이는 콘크리트에 열을 가하면 콘크리트의 내부조직이 변하게 되어 강성이 저하하여 속도에 대한 수분의 영향이 적게 나타난 것으로 판단된다.

Table 2. Test results on resonant frequency (kHz)

Δt (μs)	Sampling frequency (kHz)	Specimen			
		A		B	
		원추형 압전 탐촉자	가속도계	원추형 압전 탐촉자	가속도계
50	20	9.995	9.995	9.595	9.556
20	50	9.973	9.961	9.595	9.556
10	100	10.010	9.961	9.595	9.570
8	125	10.010	9.979	9.644	9.552
4	250	10.010	9.979	9.644	9.583
2	500	10.010	10.010	9.644	9.552



(a) M2 vs. C2



(b) M3 vs. C3

Fig. 1 Rod-wave velocity of mortar and concrete with ages

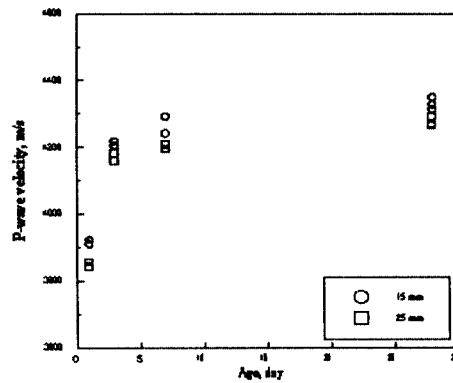
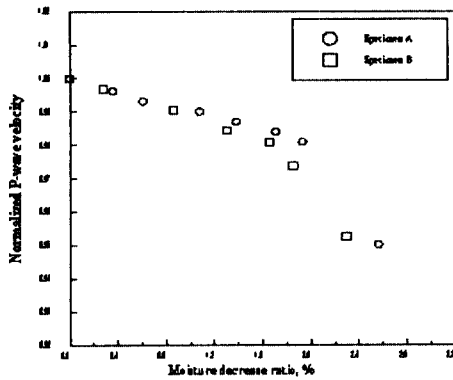
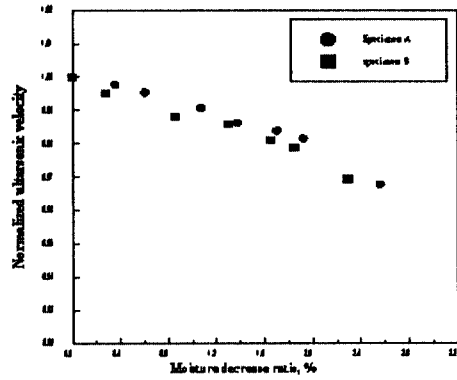


Fig. 2 Rod-wave velocity with aggregate size



(a) Normalized rod-wave velocity



(b) Normalized ultrasonic velocity

Fig. 3 Variation of P-wave velocity with moisture decrease (Oven drying)

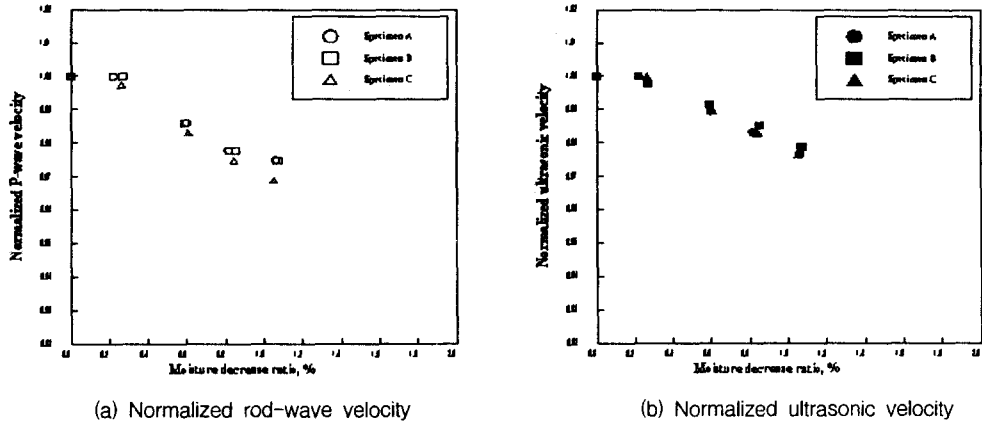


Fig. 4 Variation of P-wave velocity with moisture decrease (Controlled humidity drying)

5. 결론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 막대파 속도는 모르타르에서보다 골재가 함유된 콘크리트에서 더 크며, 같은 배합에서는 작은 크기의 골재를 사용하면 막대파 속도가 약간 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 센서의 차이와 sampling rate는 막대파 속도에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 콘크리트가 건조함에 따라 막대파 속도와 초음파 속도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 막대파 속도가 초음파 속도보다 수분의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서 속도를 이용한 콘크리트의 강도 평가시 구속도에 대한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동수, 이광명, "탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사", *콘크리트 학회지*, 제10권 2호, pp. 40-49, 1998.
2. Sansalone, M. and Lin, Y., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 4, pp. 394-405, 1992.
3. Pessiki, S. and Johnson, M.R., "Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, pp. 260-271, 1996.
4. Lee, J.H., Song, W.J., Popovics, T.S. and Achenbach, J.D., "Application of Advanced One-Sided Stress Wave Velocity Measurement in Concrete", *Proceedings, Fourth Far East Conference on NDT*, Cheju-do, Korea, pp. 433-442, 1997.
5. Sansalone, M. and Carino, N.J., "Detecting Delaminations in Concrete Slabs With and Without Overlays Using the Impact-Echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 2, pp. 175-184, 1986.
6. 심종성 "비파괴 시험법의 분류 및 특성", *콘크리트 학회지*, 제6권 2호, pp. 3-7, 1994.