

압축파 속도를 이용한 콘크리트의 강도 평가

Evaluation of Concrete Strength Using Compression Wave Velocity

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

ABSTRACT

Among several non-destructive testing methods, ultrasonic pulse velocity method has been widely used for the evaluation of concrete strength. However, this method might not provide accurate estimated results since factors influencing the relationship between strength and wave velocity is not considered. In this study, the evaluation methods of concrete strength using compression wave velocities measured by either ultrasonic pulse velocity method or impact-resonance method are proposed. A basic equation is obtained by the linear regression with velocity vs. strength data at a specific age and then, ageing factor is employed in the equation to consider the difference of the increasing rate between wave velocity and strength. Strengths predicted by the proposed equation agree well with test results.

1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 안전진단과 효율적인 유지관리를 위해 비파괴검사(NDT)가 널리 사용되고 있다. 콘크리트 강도를 추정하기 위한 여러 가지 비파괴검사 방법 중에서 비교적 사용이 편리한 반발경도법과 초음파 속도법, 그리고 반발경도와 초음파 속도의 병행에 의한 방법이 표준화되어 널리 사용되고 있다^{1,2)}. 그러나 비파괴검사의 측정치와 강도의 관계는 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 기존의 방법으로 추정된 강도는 실제강도와 많은 차이를 나타낼 수 있다.

이 연구에서는 초음파 속도법과 충격공진법에 의해 측정된 압축파 속도를 이용하여 기존의 속도를 이용한 강도 추정 방법에 비해 실제강도를 보다 잘 예측할 수 있는 콘크리트의 강도 평가 기법이 제안되었다.

2. 이론 배경

2.1 초음파 속도

매질의 밀도에 따라 파의 전달속도가 다르다는 원리를 이용한 방법으로써 콘크리트 표면에 위치한 발진자에서 발신된 초음파가 콘크리트 매질을 통해 인접한 수신자로 되돌아오는 시간의 측정을 통해 구해진 압축파 속도를 이용하여 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 등을 추정하는 방법이다³⁾.

관찰하며 등방성의 탄성 매질에서 측방향 변위가 구속되어 있는 경우의 압축파 속도는 탄성계수와 밀도, 그리고 포아송 비와 관련이 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

여기서, M은 구속계수, E는 재료의 영계수, ν 는 포아송 비, ρ 는 밀도를 나타낸다.

*성회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

**성회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

***한국과학기술원 토목공학과 부교수

****한국통신 가입자망 연구소 선임연구원

2.2 충격공진법

충격공진법은 시험 대상체에 일시적으로 기계적인 충격을 가했을 때 발생하는 압축파의 반향특성으로 인해 유발되는 공진현상을 이용하는 것으로 공진주파수로부터 압축파 속도를 구한 후 이를 이용하여 콘크리트의 강도나 탄성계수 등을 예측하는 방법이다. 콘크리트 공시체와 같이 측방향 변위가 허용되는 경우에 막대파 속도(rod-wave velocity), V_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$V_c = 2df \quad (2)$$

여기서, d 는 공시체의 높이, f 는 공진주파수이다.

막대파에 의한 공진주파수는 시간영역에서의 변위 파형을 FFT를 통해 주파수영역으로 변환시켜 결정된다. 일반적으로 콘크리트의 포아송 비가 0.2일 때 압축파 속도와 막대파 속도의 관계는 식 (1)로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$V_c = 0.95 V_p \quad (3)$$

식 (3)에서 보듯이 압축파 속도가 구속의 영향으로 막대파 속도보다 약 5% 정도 크므로 실제 구속된 콘크리트 구조물에서의 측정된 압축파 속도로부터 막대파 속도를 구하고자 할 때에는 압축파 속도에 0.95를 곱해야 한다.

2.3 압축파 속도와 강도의 상관관계

콘크리트의 압축파 속도는 탄성계수, 강도와 같은 콘크리트의 재료 성질과 상관성이 있기 때문에 정확한 압축파 속도의 측정을 통해서 콘크리트의 재료 성질들을 추정할 수 있다. 그러나 압축파 속도 - 강도의 관계가 대상 콘크리트마다 다르며 콘크리트의 수분함유량과 온도 등 여러 요인에 의해 영향을 받고 재령에 따라 속도와 강도의 발현정도가 서로 다르기 때문에 이러한 인자들이 고려되지 않으면 압축파 속도와 강도가 높은 상관관계를 갖기가 어렵다⁵⁻⁶⁾.

3. 압축파 속도에 의한 강도 평가 기법

초음파 속도법에 의해 측정된 압축파 속도와 충격공진법에 의해 측정된 막대파 속도를 이용한 강도 평가 방법들이 Table 3에 정리되어 있다. P 파 속도가 측정된 경우에는 식 (3)으로부터 막대파 속도를 구하여 다음의 방법이 적용될 수 있다.

Table 1. Nondestructive Evaluation Methods of Concrete Strength using Compression Wave

Method	Estimation Equations	Number of Data used for Regression	Ageing factor (k)
A	$f_c' = aV + b$	All data	Not used
B	$f_c(t) = aV(t) + b, f_c'(t) = k_1(t)f_c(t)$	28 days data	Used
C	$f_c(t) = a[V(t)]^b, f_c'(t) = k_2(t)f_c(t)$	28 days data	Used

* V : compression wave velocity
($V = V_p$ for ultrasonic pulse velocity, $V = V_c$ for rod-wave velocity),
 t : ageing(day), $k(t)$: ageing factor, $f_c(t), f_c'(t)$: compressive strength

Method A는 기존의 압축파 속도를 이용한 강도 평가 기법과 동일한 방법으로 콘크리트 배합비, 재령에 관계없이 측정된 압축파 속도와 강도 데이터에 대해 선형 회귀분석된 식을 이용하여 강도를 추정하는 방법이다. 일본 콘크리트학회에서 제안한 강도 추정 방법은 Method A와 같으며, 추정식은 $f_c' = 215V_p - 620$ 이다.

Method B는 Method A가 모든 데이터를 사용하는 반면에 이 방법은 기준재령에서 측정된 속도와 강도 데이터를 회귀분석해 얻어진 선형 일차식에 재령계수를 도입하여 콘크리트의 강도를 평가하는 방법이다.

Method C는 Method B와 동일하게 기준 재령에서의 데이터와 재령계수를 사용하지만 압축과 속도와 강도의 관계를 다음과 같이 선형이 아닌 비선형으로 가정한 방법이다. 상수 a, b와 재령계수 k(t)의 결정, 강도 추정 방법은 Method B와 동일하다.

4. 실험 연구

4.1 재료 및 배합비

콘크리트 배합에 사용된 굵은 골재는 최대치수가 25 mm인 화강암 쇄석이, 잔 골재는 표준모래가 사용되었다. 실험에 사용된 세가지 종류의 콘크리트 배합비는 Table 2에 나타난 바와 같이 단위 수량은 185 kg/m^3 으로 일정하고 단위시멘트량에 조금씩 차이가 있으며, 공기량을 5.0% 정도로 조절하기 위해 AE 감수제가 시멘트량의 0.2%가 사용되었다.

Table 2. Mix Proportion of Three Concrete Mixtures (kg/m^3)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	Air (%)	AEWR/C (%)	W/C
			Coarse	Fine				
C1	185	320	1041.4	696.9	41	6.0	0.2	0.58
C2	185	350	1008.3	703.1	41	6.0	0.2	0.53
C3	185	400	1032.0	691.0	40	6.0	0.2	0.46

4.2 실험 방법

재령에 따른 콘크리트의 압축과 속도와 강도의 변화정도를 알아보기 위해 다음의 양생방법이 사용되었다. Table 1의 C1, C2, C3 배합비로 제작된 공시체($\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$)는 타설직후 항온항습실에서 24시간 동안 양생되었으며, 이후 몰드에서 꺼내져 14일 동안은 수중 양생되다가 재령 14일째 되는 날에 물 속에서 꺼내져 온도가 20°C 이고 상대습도가 40%인 항온항습실에서 기건양생되었다. 그리고 표준양생된 콘크리트의 재령에 따른 압축강도를 알아보기 위해 제작된 공시체의 반은 계속해서 수중양생되었다. 실험 재령일은 28, 56, 84, 112일(4, 8, 12, 16주)이었으며, 콘크리트 공시체의 압축강도는 KS F2405에 준하여 재령별로 측정되었다.

5. 실험 결과 및 분석

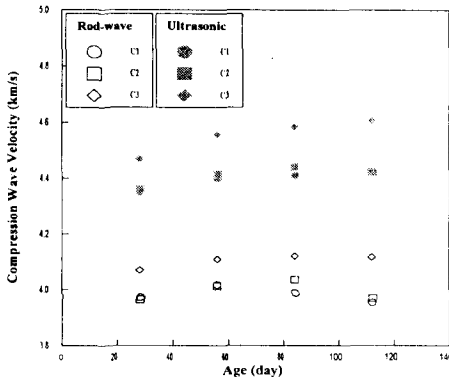
5.1 재령에 따른 압축과 속도, 압축강도 및 재령계수

C1, C2, C3 배합에 대한 재령별 압축과 속도와 압축강도의 평균을 Fig. 1의 (a), (b)에 각각 나타내었다. Fig. 1(a)를 보면 초음파 속도가 막대와 속도보다 약 10% 정도 크게 나타났고, 재령 28일에서 재령 84일까지는 점차 증가하는 경향을 보였으나 재령 112일에서는 약간 감소하는 경향을 보였다. Fig. 1(b)를 보면 압축강도는 재령에 따라 계속 증가하는 경향을 나타냈으며, 동일한 단위수량에 대해 단위 시멘트량이 많은 C3 배합의 압축강도가 가장 크게 나타났다. C1, C2, C3 배합으로부터 제작된 공시체의 재령 28일 평균 압축강도는 수중양생된 경우에는 각각 28.9, 29.3, 33.4 MPa 이었으며, 기건양생된 경우에는 29.1, 31.2, 36.2 MPa로 수중양생된 경우보다 6~8% 정도 크게 나타났다.

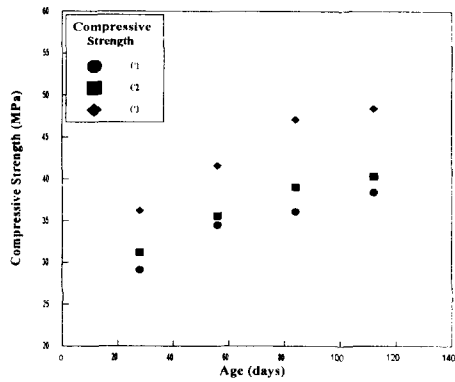
Fig. 2에는 기건양생에서의 세 종류 배합비에 대한 압축과 속도와 압축강도의 증가 정도를 재령 28일을 기준으로 하여 무차원으로 나타내었다. Fig. 2(a), (b)를 보면, 재령 112일까지 압축강도는 약 29~34% 정도 증가하였으나 속도 증가율은 막대와 속도가 1.1~1.8%, 초음파 속도는 1.5~3.0% 정도로 압축강도에 비해 상당히 낮은 증가율을 나타내었다. 이러한 경향을 볼 때 112일 이후의 장기 재령으로 갈수록 막대와 속도의 증가율 변화는 거의 없는 것에 비해 압축강도는 상대적으로 증가율이 클 것으로 예측된다. 또한 강도 추정식에 사용된 재령계수를 Table 3에 나타내었다. 재령계수는 재령 28일을 기준으로 재령에 따라 점차 증가하였다. 장기 재령으로 갈수록 압축과 속도와 압축강도의 증가율 변화가 감소할 것으로 예상되기 때문에 이에 따른 재령 계수도 일정한 값으로 수렴할 것으로 사료된다.

Table 3. Ageing Factors

Used Method	Type	Method	Ageing Factor	Age (days)			
				28	56	84	112
Impact Resonance	V_c	B	$k_1(t)$	1.0	1.07	1.17	1.29
		C	$k_2(t)$	1.0	1.08	1.17	1.30
Ultrasonic Pulse Velocity	V_p	B	$k_1(t)$	1.0	1.06	1.17	1.18
		C	$k_2(t)$	1.0	1.07	1.17	1.18

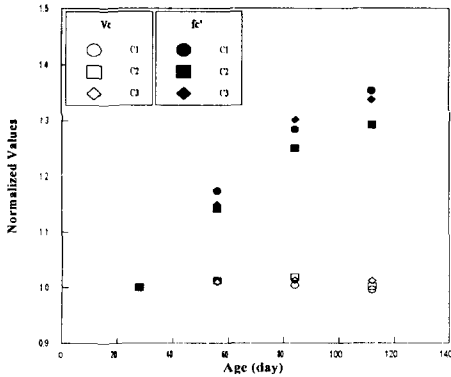


(a) Rod-wave and Ultrasonic Velocity

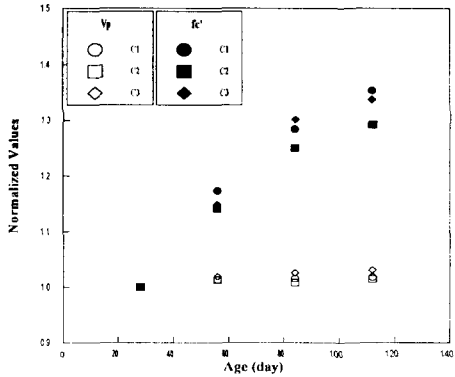


(b) Compressive Strength

Fig. 1 Average of Compression Wave Velocity and Compressive Strength with Ages



(a) V_c and f_c'



(a) V_p and f_c'

Fig. 2 Normalized Compression Wave Velocity and Compressive Strength with Ages

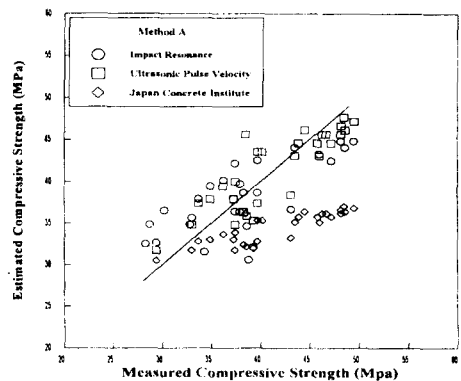
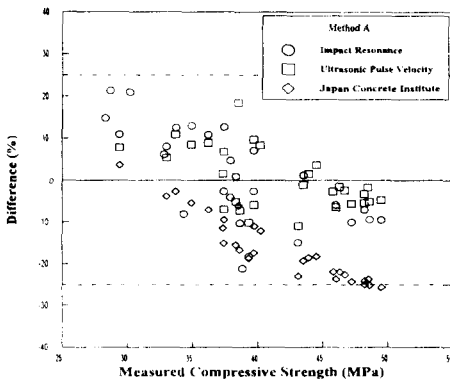
5.2 압축과 속도에 의한 강도 추정

Fig. 3에 막대과 속도와 초음파 속도를 이용한 강도 평가 방법에 의해 추정된 강도와 실제강도가 비교되었다.

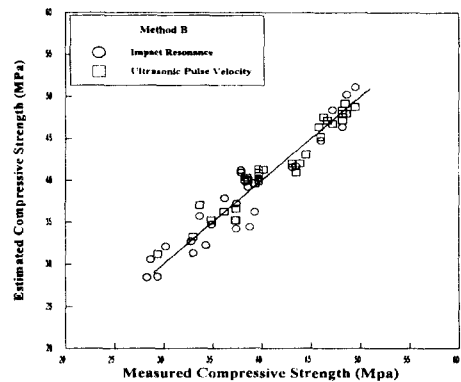
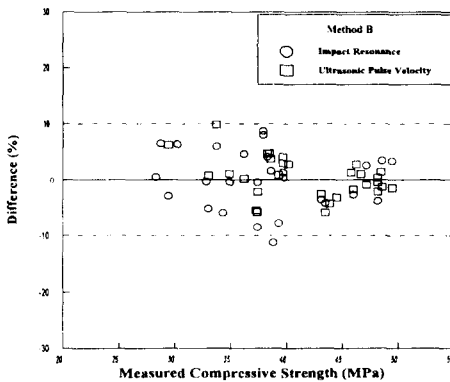
Method A에 대한 결과를 나타내는 Fig. 3(a)를 보면 추정강도와 실제강도의 차이가 약 $\pm 25\%$ 정도로 오차범위가 매우 크게 나타났으며 상관관계 역시 다소 분산된 형태를 나타내었다. Method A와 일본 콘크리트학회 제안식은 재령 초기에는 실제 강도보다 과대 평가되다가 재령이 증가함에 따라서는 오히려 과소 평가되는 경향을 나타내었다. 이러한 이유는 재령에 따라 속도와 강도의 발현률 차이가 고려되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 이러한 평가 방법으로는 정확한 강도의 추정이 어려울 것으로 판단된다.

Method B에 대한 결과를 나타내는 Fig. 3(b)를 보면 Fig. 4(a)와는 달리 추정강도와 실제강도의 차이가 약 $\pm 10\%$ 정도로 오차범위가 크게 줄어들었으며 추정강도와 실제강도의 상관관계가 높게 나타났다. 이러한 결과로부터 이 방법을 이용하면 기존의 방법보다 오차를 상당히 줄여 보다 정확한 강도 평가가 이루어 질 수 있을 것으로 사료되며, 기준재령에서의 실험데이터만을 사용하기 때문에 제안식을 결정하기가 편리할 것으로 판단된다.

Method C에 대한 결과를 나타내는 Fig. 3(c)를 보면 Method B에 의한 방법과 비슷한 정도의 오차 범위를 보였다. 따라서 Method B와 Method C는 별 차이가 없기 때문에 어느 방법을 사용해도 큰 무리가 없지만 실제에 적용하기에는 선형의 속도-강도의 관계를 결정하기가 편리하기 때문에 Method B가 더 실용적일 것으로 사료된다



(a) Method A



(b) Method B

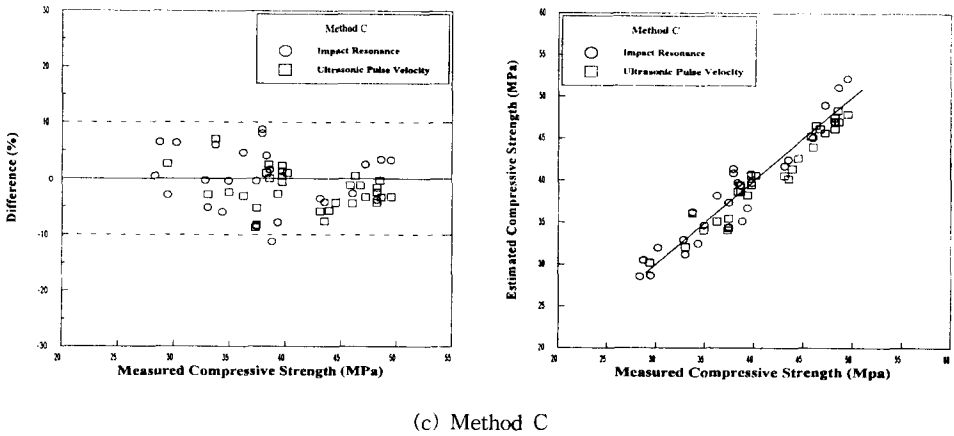


Fig. 3 Difference and Correlation between Measured and Estimated Compressive Strength by Compressive Wave Velocity

6. 결론

이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 초음파 속도법에 의해 측정된 압축파 속도가 충격공진법에 의해 측정된 막대파 속도보다 약 10% 정도 크게 나타났으며, 재령에 따른 콘크리트의 압축파 속도와 강도의 발현정도가 현저한 차이를 보임을 알 수 있었다. 따라서 이러한 발현률 차이를 고려하기 위해 강도 평가식에 재령계수가 도입되었다.
- (2) 기존의 비파괴적 콘크리트 강도 평가 방법으로 초음파 속도법외에 충격공진법의 적용성이 확인되었으며, 기존 재령에서의 속도-강도의 선형식에 재령계수가 도입된 강도 평가 방법에 의해 추정된 강도가 실제강도에 보다 잘 일치되었다.

참 고 문 헌

- 1) Ohtsu, M., "New Trends in Non-Destructive and In-Place Testing of Concrete Structures," *Proceedings of the International RILEM Workshop on Technology Transfer of the New Trends in Concrete*, Barcelona, 1995, pp. 239-256.
- 2) Soshiroda, T., "Ultrasonic Pulse Velocity as an Indicator of Concrete Quality," *Proceedings of the Second International Conference on Concrete under Severe Conditions, ConSec'98*, Norway, 1998, Vol. 3, pp. 2093-2102.
- 3) 한국 콘크리트학회, *콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단*, 기문당, 1995, pp. 76-81.
- 4) Sansalone, M. and Streett, W. B., *Impact-Echo*, Bullbrier Press, 1997, pp. 72-73.
- 5) 이광명, 이회근, 김동수, 김지상, "콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구," *콘크리트학회 학술발표회*, 제10권 2호, 1998, pp. 725-730.
- 6) Lee, J. H., Song, W. J., Popovics, J. 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, 1997, pp. 433-442.