

충격공진법 및 복합법을 이용한 콘크리트의 강도 평가 기법

Evaluation Technique of Concrete Strength Using
Impact-Resonance and Combined Method



이 광 명*
Lee, Kwang-Myong



이 회 근**
Lee, Hoi-Keun



김 동 수***
Kim, Dong-Soo



김 지 상****
Kim, Ji-Sang

ABSTRACT

Among several non-destructive testing methods, ultrasonic pulse velocity method and rebound index method have been widely used for the evaluation of concrete strength. However, such methods might not provide accurate estimated results since factors influencing the relationship between strength and either ultrasonic pulse velocity or rebound index are not considered. In this paper, the evaluation method of concrete strength using rod-wave velocity measured by impact-resonance method is proposed. A basic equation is obtained by the linear regression of velocity vs. strength data at a specific age and then, aging 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. Furthermore, the combined method of rod-wave velocity and rebound index is proposed.

Keywords : non-destructive test, ultrasonic pulse velocity method, impact-resonance method, rebound index, combined method, aging factor.

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

**** 정회원, 한국통신 기업자망 연구소 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 안전진단과 효율적인 유지관리를 위해 비파괴시험(NDT)의 활용도가 높아지고 있다. 콘크리트 강도를 추정하기 위한 여러 가지 비파괴시험 방법 중에서 비교적 사용이 편리한 반발도법과 초음파 속도법, 그리고 반발도와 초음파 속도의 복합법이 규준화되어 널리 사용되고 있다⁽¹⁻²⁾. 하지만 비파괴시험의 측정치와 강도의 관계는 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 기존의 방법으로 추정된 강도는 실제강도와 많은 차이를 나타내는 경향을 보이고 있다.

이 연구에서는 콘크리트의 비파괴시험에 적용성이 입증된 바 있는 충격공진법에 의해 측정된 종파 속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 평가하는 기법이 제안되었다. 재령에 따른 종파 속도와 강도의 발현률 차이를 고려하기 위하여 강도평가식에 재령계수를 도입하여 강도평가의 정확도를 높이고자 도모하였다. 또한 충격공진법과 반발도법의 복합에 의한 강도 평가 방법도 제안되어 비교, 검토되었다.

2. 이론 배경

2.1 충격공진법

충격공진법은 시험 대상체에 기계적인 충격을 가했을 때 발생하는 종파의 반향특성으로 인해 유발되는 공진현상을 이용하는 것으로 공진이 일어날 조건은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, Δt 는 종파가 한번 반사되어 되돌아 오는 시간, T 는 진동주기, f 는 주파수이다.

콘크리트 공시체와 같이 측방향 변위가 허용되는 봉과 같은 형태의 매질을 따라 전파하는 경우에는 공시체에서 파가 한번 왕복한 이동경로는 공시체 높이(d)의 2배이므로 막대파 속도(rod-wave velocity), V_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, E 는 재료의 탄성계수, ρ 는 밀도를 나타낸다. 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⁽³⁾.

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

막대파에 의한 공진주파수는 시간영역에서의 변위파형을 FFT를 통해 주파수영역으로 변환시켜 결정된다. 규칙하며 등방성의 탄성 매질에서 측방향 변위가 구속되어 있는 경우의 P 파 속도, V_p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

여기서, M 은 구속계수, ν 는 포아송비를 나타낸다. 일반적으로 콘크리트의 포아송 비가 0.2일 때 P 파 속도와 막대파 속도의 관계는 식 (4)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$V_c = 0.95 V_p \quad (5)$$

식 (5)에서 보듯이 P 파 속도가 구속의 영향으로 막대파 속도보다 약 5% 정도 크므로 실제 콘크리트 구조물에서의 측정한 P 파 속도로부터 막대파 속도를 구하고자 할 때에는 P 파 속도에 0.95를 곱해야 한다⁽⁴⁾.

2.2 콘크리트의 강도 평가에 영향을 미치는 인자

콘크리트의 종파 속도는 탄성계수, 강도와 같은 콘크리트의 재료 성질과 상관성이 있기 때문에 정확한 종파 속도의 측정을 통해서 콘크리트의 재료 성질들을 추정할 수 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 그러나 종파 속도는 콘크리트의 수분함유량과 온도 등 여러 요인에 의해

영향을 받으며 재령에 따른 속도와 강도의 발현정도가 서로 다르기 때문에 이러한 인자들이 고려되지 않으면 종파 속도와 강도가 높은 상관관계를 갖기가 어렵다⁽⁸⁻⁹⁾. 또한 콘크리트의 종파 속도 변화량에 비해 강도 변화량이 상대적으로 크기 때문에 즉, 종파 속도가 조금만 변하여도 강도가 매우 민감하게 변하므로 종파 속도로부터 강도를 추정하는 데에 상당한 어려움이 있다. 따라서 실제 강도에 보다 근접한 강도 추정을 위해서는 강도평가에 영향을 미치는 인자를 고려하여 속도와 강도의 관계가 설정되어야 할 것으로 판단된다.

3. 충격공진법에 의한 강도 평가 기법

3.1 막대파 속도에 의한 강도 추정

충격공진법에 의해 측정된 막대파 속도만을 이용하여 강도를 추정하는 방법이 다음과 같이 제안되었다. P 과 속도가 측정된 경우에는 식 (5)를 이용하여 막대파 속도를 구하여 다음의 방법이 적용될 수 있다.

(1) A 방법

기존의 초음파 속도를 이용한 강도 평가 기법과 동일한 방법으로 콘크리트 배합비, 재령에 관계없이 측정된 막대파 속도와 강도 데이터가 다음과 같이 선형 일차식으로 회귀분석된 식을 이용하여 강도를 추정하는 방법이다.

$$f_c' = a V_c + b \quad (6)$$

여기서, f_c' 은 추정강도, V_c 는 막대파 속도, a , b 는 상수이다.

(2) 방법 B

A 방법이 모든 데이터를 사용하는 반면에 이 방법은 기준재령에서 측정된 속도와 강도 데이터를 회귀분석해 얻어진 선형 일차식에 재령계수를 도입하여 콘크리트의 강도를 평가하는 방법이다. 막대파 속도와 강도의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$f_c(t) = a V_c(t) + b \quad (7)$$

$$f_c'(t) = k_1(t) f_c(t) \quad (8)$$

여기서, t 는 재령(일), $k_1(t)$ 은 재령계수, $f_c(t)$ 와 $f_c'(t)$ 는 각각 기준식으로부터 구한 압축강도와 실제 재령에서의 추정강도를 나타낸다.

식 (7)과 (8)의 상수 a , b 와 재령계수의 결정방법은 다음과 같다. 강도 추정을 위해 먼저 기준 재령의 데이터가 회귀분석되어 식 (7)의 상수 a , b 가 결정된다. 기준 재령은 설계기준강도의 기준이 되는 28일이 추천된다. 기준 재령이 아닌 임의의 재령에서 속도와 강도의 데이터 또는 데이터가 없는 경우에는 재령에 따른 강도와 속도의 예측발현곡선으로부터 식 (8)의 재령계수가 구해질 수 있다. 즉 재령이 t 에서의 콘크리트의 막대파 속도를 식 (7)에 대입하여 얻은 $f_c(t)$ 로 재령 t 에서의 실제강도인 $f_c'(t)$ 를 나누어 재령계수 $k_1(t)$ 가 결정된다. 재령계수는 속도와 강도의 발현에 영향을 미치는 여러 인자들 즉, 시멘트의 종류, 양생방법, 콘크리트의 배합비 등에 따라 차이를 보일 수 있다. 만일 이러한 인자를 고려한 실험이 수행되어 재령계수가 결정된다면 재령 t 에서의 실제 콘크리트 강도는 식 (7)의 기준식에 의해 얻어진 $f_c(t)$ 에 재령계수를 곱하여 추정될 수 있다.

(3) C 방법

B 방법과 동일하게 기준 재령에서의 데이터와 재령계수를 사용하지만 막대파 속도와 강도의 관계를 다음과 같이 선형이 아닌 비선형으로 가정한 방법이다.

$$f_c(t) = a [V_c(t)]^b \quad (9)$$

$$f_c'(t) = k_2(t) f_c(t) \quad (10)$$

상수 a , b 와 재령계수 $k_2(t)$ 의 결정, 강도 추정 방법은 B방법과 동일하다.

3.2 막대파 속도와 반발도의 복합에 의한 강도 추정

콘크리트 강도 추정의 정확도를 높이기 위해서는

강도와 일정한 상관관계를 갖는 2가지 이상의 비파괴 시험값을 복합해서 사용하는 것이 바람직하다. 그 중에서 이미 초음파 속도와 반발도를 복합한 제안식이 사용되고 있으나 이 절에서는 충격공진법에 의해 측정된 막대파 속도와 반발도의 복합에 의한 강도 추정 방법이 제안되었다.

(1) D 방법

기존의 반발도를 이용한 강도 추정 방법과 동일하게 반발도와 강도의 모든 데이터로부터 얻은 일차식을 사용하지만 기존의 재령계수가 재령이 증가함에 따라 추정된 강도를 현저히 낮게 평가하는 경향이 있기 때문에 지금까지 반발도법에 사용되었던 재령계수의 사용이 배제된 방법이다.

$$f_c' = aR_o + b \quad (11)$$

여기서, R_o 는 수정된 반발도, a , b 는 상수이다.

(2) E 방법

기존의 초음파 속도와 반발도의 복합법과 동일한 방법으로, 실험으로부터 얻은 모든 데이터에 대해 다음과 같은 중회귀분석을 이용하여 강도를 추정하는 방법이다.

$$f_c' = aR_o + bV_c + c \quad (12)$$

여기서, V_c 는 막대파 속도, a , b , c 는 상수이다.

(3) F 방법

B 방법과 비슷한 방법으로 기준 재령에서의 반발도, 막대파 속도 측정을 병행하여 얻은 강도값에 재령계수를 곱하여 콘크리트의 강도를 추정하는 방법이다.

$$f_c(t) = aR_o(t) + bV_c(t) + c \quad (13)$$

$$f_c'(t) = k_3(t) f_c(t) \quad (14)$$

상수 a , b , c 와 재령계수 $k_3(t)$ 의 결정, 강도 추정 방법은 B 방법과 거의 같다.

4. 실험

4.1 실험 개요

충격공진법을 이용하여 강도를 추정하기 위해 재령에 따라 막대파 속도와 압축강도, 그리고 반발도가 측정되었으며, 실험결과로부터 선형과 비선형의 막대파 속도와 강도의 관계를 통한 강도 추정 방법과 막대파 속도와 반발도의 복합에 의한 강도 추정 방법이 제안되었다.

4.2 재료 및 배합비

콘크리트 배합에 사용된 굽은 골재는 최대치수가 25 mm인 화강암 쇄석이, 잔 골재는 표준모래가 사용되었다. 실험에 사용된 세가지 종류의 콘크리트 배합비는 Table 1에 나타낸 바와 같이 단위 수량은 185 kg/m³으로 일정하고 단위시멘트량에 조금씩 차이가 있으며, 공기량을 5.0% 정도로 조절하기 위해 AE 감수제가 시멘트량의 0.2%가 사용되었다.

4.3 실험 방법

(1) 막대파 속도의 측정

재령에 따른 콘크리트의 막대파 속도와 강도의 변화정도를 알아보기 위해 다음의 양생방법이 사용되었다. Table 1의 C1, C2, C3 배합비로 제작된 공시체(Φ10cm × 20cm)는 타설 직후 항온항습실(온도:

Table 1 Mixture Proportion of Three Concrete Mixtures (kg/m³)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	Air (%)	AEWR/C (%)	W/C
			Coarse	Fine				
C1	185	320	1041.4	696.9	41	5.0	0.2	0.58
C2	185	350	1008.3	703.1	41	5.0	0.2	0.53
C3	185	400	1032.0	691.0	40	5.0	0.2	0.46

20°C, 상대습도:40%)에서 24시간 동안 양생되었으며, 이후 몰드에서 꺼내져 14일 동안은 수중 양생되다가 재령 14일째 되는 날에 물 속에서 꺼내져 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, 동일한 공시체에 대해 충격공진 실험을 5회 이상 반복하여 얻은 각각의 측정값이 평균되어 막대파 속도로 결정되었다. 충격의 도입은 공시체 표면의 중심에 직경이 7.9mm인 강철구가 자유낙하되었고, 충격공진 실험에 사용된 sampling rate는 125 kHz($\Delta t=8 \mu s$)이며, 데이터 개수는 4096개로 고정되었다.

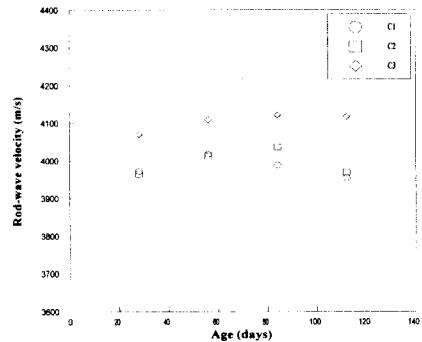
(2) 반발도의 측정

공시체를 압축시험기로 약 3 ton의 하중을 가하여 고정시킨 후 수평으로 20개 점을 타격하여 얻은 각각의 반발도가 평균되어 반발도로 결정되었으며, 반발도의 측정에는 Proceq사의 NR형 슈미트 햄머가 사용되었다. 이밖에 콘크리트 공시체의 압축강도는 KS F2405에 준하여 재령별로 측정되었다.

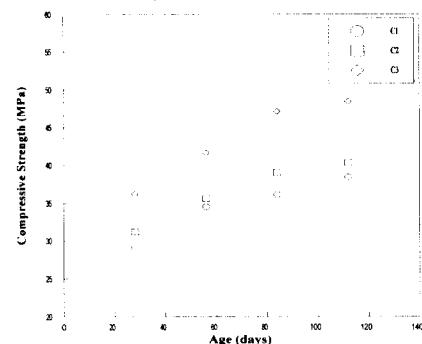
5. 실험 결과 및 분석

5.1 재령에 따른 막대파 속도와 압축강도 실험결과

C1, C2, C3 배합에 대한 재령별 막대파 속도와 압축강도의 평균을 Fig. 1의 (a), (b)에 각각 나타내었다. Fig. 1(a)를 보면 막대파 속도는 재령 28일에서 재령 84일까지는 점차 증가하는 경향을 보였으나 재령 112일에서는 약간 감소하는 경향을 보였다. 또한 C3 배합의 막대파 속도가 가장 크게 나타났으며 C1과 C2 배합은 비슷한 경향을 나타내었다. 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 이었으



(a) Rod-wave Velocity

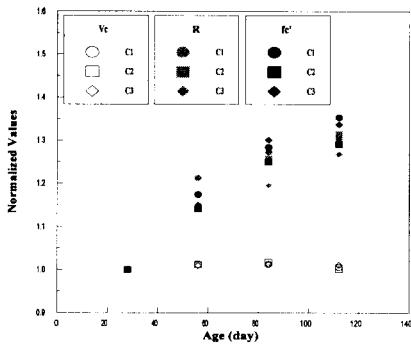


(b) Compressive Strength

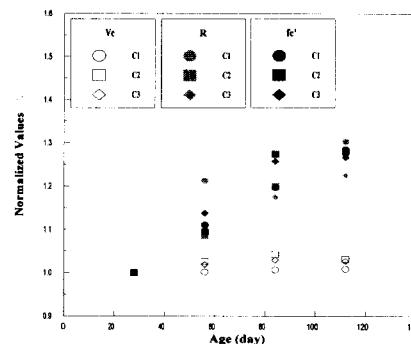
Fig. 1 Average of Rod-wave Velocity and Compressive Strength with Ages

며, 기건양생된 경우에는 29.1, 31.2, 36.2 MPa로 수중양생된 경우보다 6~8% 정도 크게 나타났다.

Fig. 2에는 양생방법에 따른 세 종류 배합비의 막대파 속도와 압축강도 및 반발도의 증가 정도를 재령 28일을 기준으로 하여 무차원으로 나타내었다. 기건양생에서의 증가 정도를 나타내는 Fig. 2(a)를 보면, 재령 112일까지 압축강도는 약 29~34% 정도 증가하였으나 막대파 속도의 증가율은 1.1~1.8% 정도로 압축강도에 비해 상당히 낮은 증가율을 나타내었다. 이러한 경향을 볼 때 112일 이후의 장기 재령으로 갈수록 막대파 속도의 증가율을 변화는 거의 없는 것에 비해 압축강도는 상대적으로 증가율이 클 것으로 예측된다. 따라서 막대파 속도와 압축강도의 상관관계를 이용하여 보다 정확한 콘크리트의 강도를 평가하기 위해서는 막대파 속도와 압축강도의 재령의 증가에 따른 발현률 차이가 고려되어져야 할 것으로 판단된다.



(a) Dry Condition



(b) Moisture Condition

Fig. 2 Normalized Rod-wave Velocity, Compressive Strength and Rebound Hardness of concrete with Ages

그러나 재령 증가에 따른 반발도의 증가율은 속도와는 달리 압축강도의 증가율과 비슷한 경향을 보였다. 이로부터 반발도와 압축강도의 관계가 속도와 압축강도의 관계에 비해 상관성이 높기 때문에 기존의 반발도에 의한 강도 추정시 사용된 재령계수를 사용하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

수중양생에서의 증가 정도를 나타내는 Fig. 2(b)를 보면, Fig. 2(a)와 마찬가지로 재령에 따른 반발도와 압축강도의 증가율은 서로 비슷한 경향을 나타낸 반면에 막대파 속도의 증가율은 압축강도의 증가율과 많은 차이를 보였다. 또한 기건양생에서의 속도 증가율에 비해 수중양생에서의 속도 증가율이 다소 크게 나타났는데, 이는 기건양생된 공시체의 속도는 재령이 지나면서 공시체의 수분함유량이 감소하게 되고 이로 인해 속도의 증가가 거의 없는 것으로 나타난 것에 비해 계속해서 수중양생된 공시체는 재령에 따른 강도 증가와 더불어 속도 또한 증가한

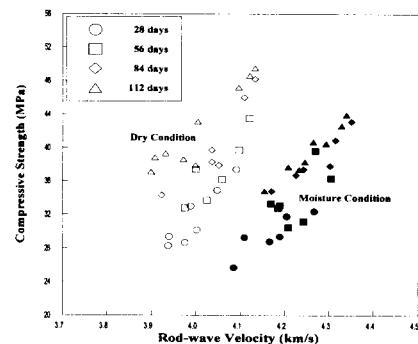


Fig. 3 Relationship between Rod-wave Velocity and Compressive Strength of Concrete Under Dry and Moisture Curing Condition

것으로 사료된다.

기건양생외에 실험전까지 수중양생된 공시체에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 얻은 Fig. 3을 보면 속도와 강도의 관계가 기건양생과 수중양생에서 서로 다른 경향을 나타내었다. 이로부터 속도를 이용한 강도추정시에는 양생방법이 중요한 영향 인자임을 알 수 있다. 실제 콘크리트의 양생조건이 기건양생에 가깝기 때문에 이 연구에서는 기건양생한 경우의 실험결과로부터 강도추정식을 도출하였다.

5.2 추정식 결정

실험 결과로부터 각각의 평가 방법별로 결정된 관계식이 Table 2에 정리되어 있다. 실험으로부터 얻어진 데이터는 모두 27개로 이중에서 기준재령으로 선택된 재령 28일 데이터는 7개이었다.

Table 2를 보면 A 방법에서 사용된 관계식의 상관계수는 0.51로 낮았으나 그 외에 사용된 관계식의 상관계수가 0.80이상으로 비교적 상관관계가 높게 나타났다. Table 2에 보는 바와 같이 보다 정확한 강도 평가를 위해 하나의 비파괴시험 측정치를 이용하기보다는 두 가지의 측정치를 병행하는 것이 바람직한 방법임을 알 수 있다.

3.1절에 언급한 방법대로 구해진 B, C, F 방법의 재령계수를 Table 3에 나타내었다. 재령계수는 재령 28일을 기준으로 재령에 따라 점차 증가하였다. 장기 재령으로 갈수록 막대파 속도와 압축강도의 증가율 변화가 감소할 것으로 예상되기 때문에

Table 2 Coefficients of Nondestructive Evaluation Methods

Type	Method	Equation	Data Number	Correlation Coefficient
V_c	A	$f'_c = 63.1 V_c - 216$	27	0.51
	B	$f_c(t) = 57.5 V_c(t) - 198$ $f'_c(t) = k_1(t) f_c(t)$	7	0.85
	C	$f_c(t) = 0.00179 [V_c(t)]^{7.06}$ $f'_c(t) = k_2(t) f_c(t)$	7	0.84
R	D	$f'_c = 1.024 R - 5.484$	27	0.93
$V_c + R$	E	$f'_c = 0.917 R_o + 13.8 V_c - 56.46$	7	0.94
	F	$f_c(t) = 0.458 R_o(t) + 32.19 V_c(t) - 113.4$ $f'_c(t) = k_3(t) f_c(t)$	7	0.94

Table 3 Aging Factors

Type	Method	Aging Factor	Age (days)			
			28	56	84	112
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
$V_c + R$	F	$k_3(t)$	1.0	1.03	1.09	1.13

이에 따른 재령 계수도 일정한 값으로 수렴할 것으로 사료된다.

5.3 막대파 속도에 의한 강도 추정

Fig. 4에 막대파 속도만을 이용한 강도 평가 방법인 A, B, C 방법에 의해 추정된 강도와 실제 강도가 비교되었다.

(1) A 방법

Fig. 4(a)를 보면 추정강도와 실제강도의 차이가 약 $\pm 20\%$ 정도로 오차범위가 매우 크게 나타났으며 오차의 평균은 10%이었다. 또한 상관관계 역시 다소 분산된 형태를 나타내었다.

A 방법에서는 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.

(2) B 방법

Fig. 4(b)를 보면 Fig. 4(a)와는 달리 추정강도와 실제강도의 차이가 약 $\pm 10\%$ 정도로 오차범위가 크게 줄어들었으며 오차의 평균은 4.2%였다. 그리고 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, 기준 재령에서의 실험 데이터만을 사용하기 때문에 제안식을 결정하기가 편리할 것으로 판단된다.

(3) C 방법

Fig. 4(c)를 보면 B 방법에 의한 것과 비슷한 정도의 오차범위를 나타내었으며 오차의 평균도 4.2%로 B 방법과 동일하게 나타났다. 따라서 B 방법과 C 방법은 별 차이가 없기 때문에 어느 방법을 사용해도 큰 무리가 없지만 실제에 적용하기에는 선형의 속도-강도의 관계를 결정하기가 편리하기 때문에 B 방법이 더 실용적일 것으로 사료된다.

Table 4 Comparison of Measured Strengths and Estimated Strengths (dry curing)

Mixing Type	Age (days)	No.	Measurement			Estimated Compressive Strength (MPa)					
			R	V _c (m/s)	f _{c'} (MPa)	Method A	Method B	Method C	Method D	Method E	Method F
C1	28	①	35	3938	28.3	32.5	28.4	28.5	30.4	30.0	29.4
		②	33	3975	28.7	34.8	30.6	30.5	28.3	28.7	29.1
		③	32	4002	30.2	36.5	32.1	32.0	27.3	28.1	29.2
	56	①	39	3975	32.8	34.8	32.7	32.9	34.5	34.2	33.7
		②	41	4059	36.2	40.1	37.9	38.2	36.5	37.1	37.0
	84	①	42	4052	37.9	39.7	40.9	40.8	37.5	38.0	38.8
		②	41	3923	34.3	31.5	32.3	32.5	36.5	35.3	34.9
	112	①	42	3908	38.8	30.6	34.5	35.2	37.5	36.0	37.0
		②	43	3999	37.9	36.3	41.2	41.4	38.5	38.2	40.0
C2	28	①	37	3988	33.0	35.6	31.3	31.2	32.4	32.5	31.8
		②	33	3940	29.4	32.6	28.6	28.6	28.3	28.2	28.2
	56	①	39	4000	37.4	36.4	34.2	34.4	34.5	34.5	34.3
		②	40	4024	33.7	37.9	35.7	36.0	35.5	35.7	35.5
	84	①	44	4036	38.3	38.7	39.9	39.7	39.6	39.6	39.6
		②	44	4036	39.7	38.7	39.9	39.7	39.6	39.6	39.6
	112	①	48	4004	43.1	36.7	41.6	41.7	43.7	42.8	43.2
		②	46	3932	39.3	32.1	36.2	36.7	41.6	40.0	40.1
		③	45	3972	38.6	34.6	39.2	39.4	40.6	39.6	40.5
C3	28	①	42	4091	37.4	42.1	37.2	37.4	37.5	38.5	37.4
		②	40	4048	34.9	39.4	34.8	34.7	35.5	36.1	35.1
	56	①	47	4121	43.5	44.0	41.7	42.5	42.6	43.5	42.2
		②	46	4097	39.7	42.5	40.2	40.8	41.6	42.3	41.0
	84	①	50	4133	48.2	44.8	46.4	47.0	45.7	46.4	45.7
		②	48	4109	46.0	43.3	44.8	45.1	43.7	44.3	43.9
	112	①	51	4121	48.6	44.0	50.3	51.1	46.7	47.2	48.0
		②	53	4133	49.5	44.8	51.1	52.2	48.8	49.2	49.6
		③	52	4096	47.2	42.5	48.4	49.0	47.8	47.7	48.0

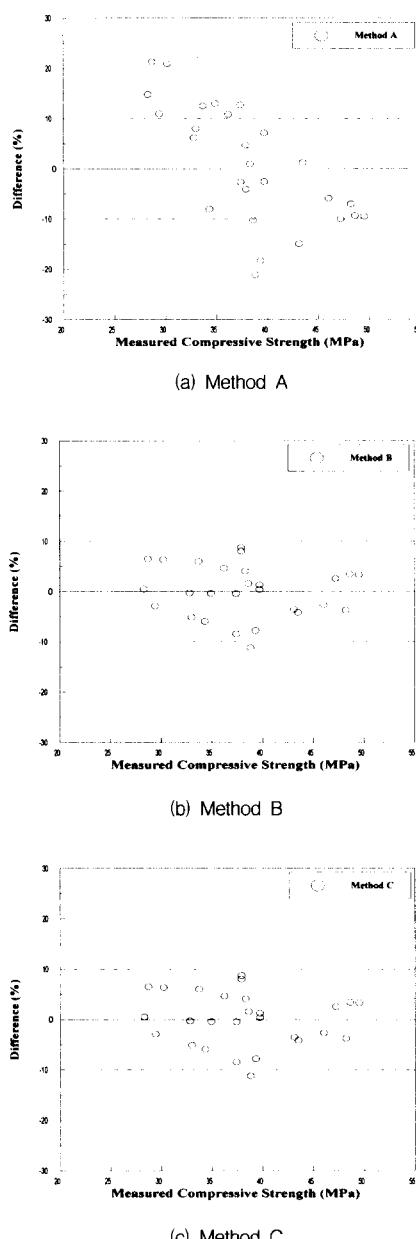


Fig. 4 Difference and Correlation between Measured and Estimated Compressive Strength by Rod-wave Velocity

5.4 막대파 속도와 반발도의 복합법에 의한 강도 추정

Fig. 5에 반발도를 이용한 강도 평가 방법인 D

방법과 막대파 속도와 반발도의 복합법인 E 방법과 F 방법에 대해 각각의 방법에 의해 추정된 강도와 실제강도가 비교되었다.

(1) D 방법

Fig. 5(a)를 보면 추정강도와 실제강도의 차이가 약 $\pm 10\%$ 정도로 오차범위가 비교적 작게 나타났으며 오차의 평균은 3.6%이었다. 기존의 반발도에 의한 강도 추정에는 재령계수가 사용된 경우가 있으나 실험결과를 보면 재령계수를 사용하지 않고 강도를 추정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

(2) E 방법

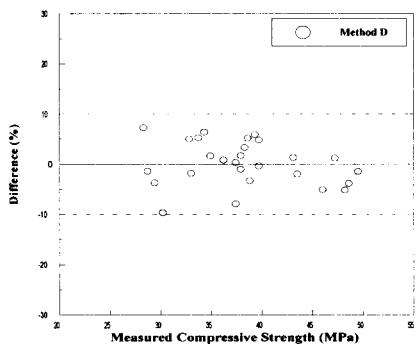
Fig. 5(b)를 보면 속도와 반발도의 병행에 의한 강도 평가 방법을 사용하는 경우에 A~D에 의한 방법보다 추정강도와 실제강도의 차이가 현저히 줄어듬을 알 수 있으며 상관성도 매우 높게 나타났다. 오차의 범위는 약 $\pm 5\%$ 정도로 나타났으며 오차평균은 3.1%이었다. 이미 초음파 속도와 반발도의 병행에 의한 방법이 규준화되어 사용되고 있지만 실험결과를 보면 막대파 속도와 반발도의 병행에 의한 강도 추정 방법도 신뢰성이 높은 것으로 사료된다.

(3) F 방법

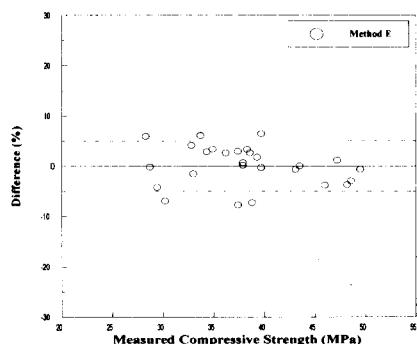
Fig. 5(c)를 보면 E 방법과 비슷한 약 $\pm 5\%$ 정도의 오차를 나타내었으며 오차 평균은 2.9%로 약간 줄어들었다. 따라서 기준재령인 재령 28일에서의 데이터와 재령계수가 사용된 방법으로도 E 방법과 같은 기존방법에 의한 강도 추정과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 같은 접근 방법인 B 방법과 비교해 보면 막대파 속도와 반발도의 복합법을 이용하면 신뢰성이 높은 강도 추정이 이루어질 것으로 판단된다.

5.5 강도 추정 방법의 제안

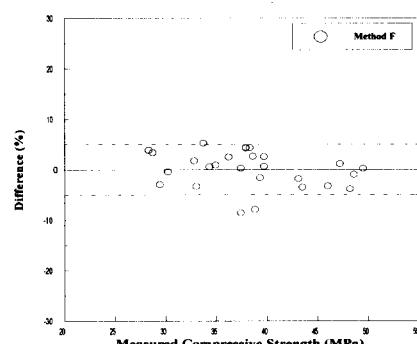
이상에서 비교한 바와 같이 막대파 속도에 의한 강도 추정에는 기존의 방법보다는 기준 재령에서의 데이터만으로 회귀분석된 막대파 속도와 강도 관계식에 재령계수가 도입된 B 방법이 가장 효과적이며,



(a) Method D



(b) Method E



(c) Method F

Fig. 5 Difference and Correlation between Measured and Estimated Compressive Strength by Rod-wave Velocity plus Rebound Index

이에 반발도가 추가된 F 방법이 실제강도에 가장 근접한 예측결과를 나타내었다. 기준 재령에서 얻어진 추정식의 상수와 재령계수는 사용된 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 양생조건, 콘크리트의 강도수준, 골재의 종류와 크기 등에 따라서 차이를 나타낼 수 있기 때문에 추후 이와 같은 인자의 영향정도를 정량적으

로 분석하기 위한 실험연구가 수행되어야 할것으로 사료된다

6. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 실험을 통하여 재령과 양생방법에 따라 콘크리트의 막대파 속도와 강도의 발현정도가 서로 협저한 차이를 보인다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 물-시멘트비와 단위시멘트량의 차이에 따라 강도 및 속도의 발현정도는 큰 차이를 나타내지 않았다.

(2) 콘크리트의 강도를 평가하기 위한 비파괴시험법으로 충격공진법의 적용성이 확인되었으며, 재령에 따른 강도와 속도의 발현률 차이를 고려하기 위한 방안으로 콘크리트의 강도 평가식에 재령계수가 도입됨으로써 기존의 강도 평가 방법보다 정확도를 높일 수 있었다.

(3) 기존의 초음파 속도와 반발도의 복합법과 같이 충격공진법과 반발도법의 복합에 의한 강도 평가 방법도 적용성이 높은 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 기초연구와 성균관대학교 SAFE 연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- 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.
- 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. Sansalone, M. and Streett, W. B., Impact-Echo, Bullbrier Press, 1997, pp. 72-73.
4. Lin, Y. and Sansalone, M., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method," ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 4, 1992, pp. 394-405.
5. 김지상, 서명우, 김동수, 이광명, "충격공진법을 이용한 초기재령 콘크리트의 동탄성계수 측정," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1996, pp. 295-298.
6. 김진근, 김훈, 노재호, "공명주기식 동탄성계수를 이용한 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 예측," 콘크리트학회논문집, 제7권 5호, 1995, pp. 164-171.
7. 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.
8. 이광명, 이희근, 김동수, 김지상, "콘크리트의 P파 속도에 영향을 주는 인자에 관한 연구," 콘크리트학회 학술발표회, 제10권 2호, 1998, pp. 725-730.
9. Sturrup, V. R., Vecchio, F. J. and Caratin, H., "Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength," In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, Edited by Malhotra, V. M., ACI, Detroit, 1984, pp. 201-227.

요 약

콘크리트의 강도 추정을 위한 여러 가지 비파괴시험 중에서 초음파 속도법과 반발도법이 널리 사용되고 있다. 그러나 평가방법이 단순하고 측정값에 영향을 미치는 인자에 대한 고려가 부족하여 정확한 강도 평가가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이 연구에서는 충격공진법에 의해 측정된 종파 속도를 이용한 콘크리트의 강도 평가 기법이 제안되었다. 기준 재령에서 얻은 종파 속도와 강도 데이터를 선형 회귀분석을 해서 구한 관계식에 재령에 따른 속도 및 강도의 발현률의 차이를 고려하기 위한 목적으로 재령계수를 도입하여 강도를 평가하는 방법이 제시되었다. 제안된 방법을 이용하여 예측한 강도가 실험값과 잘 일치하는 결과를 나타냈다. 또한 충격공진법과 반발도법의 복합에 의한 강도 평가 방법도 제안되었다.

(접수일자 : 1999. 5. 19)