

# 초음파속도법에 의한 부순모래 콘크리트의 강도 추정에 관한 연구

## A Study on the Strength Prediction of Crushed Sand Concrete by Ultra-sonic Velocity Method

김 명 식\*                      백 동 일\*\*                      염 치 선\*\*\*  
Kim, Myung-Sik              Baek, Dong-Il                  Youm, Chi-Sun

### Abstract

Schmidt hammer and ultra-sonic method are commonly used for crushed sand concrete compressive strength test in a construction field. At present, various of equations for prediction of strength are present, which have been used in a construction field. The purpose of this study is to evaluate the correlation between prediction strength by presentation equations and destructive strength to test specimen, and find out which is a suitable equation for the construction site. In this study, a strength test was carried out destructive test by means of core sampling and traditional test. The experimental parameter were concrete age, curing condition, and strength level.

### 요 지

현재 건설현장에서는 부순모래 콘크리트의 비파괴 강도 추정을 일반적으로 슈미트 해머를 이용한 반발경도법이나 초음파를 이용한 초음파속도법, 이 둘을 조합한 복합법을 이용하고 있으며 기존의 천연골재를 사용한 콘크리트에 의해 얻어진 여러 가지 제안식들에 적용시켜 추정하고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 전형적인 파괴시험과 코어채취 그리고 초음파속도법을 이용하여 부순모래 콘크리트의 강도 추정식을 제안하고자 하였다. 실험의 변수는 양생재령과 양생조건 그리고 콘크리트의 설계기준강도이다.

**Keywords :** Crushed sand concrete, Ultra-sonic velocity method, Prediction equation

**핵심 용어 :** 부순모래 콘크리트, 초음파속도법, 추정식

\* 정회원, 부경대학교 건설공학부 교수

\*\* 정회원, 부경대학교 토목공학과 공학박사

\*\*\* 정회원, 부경대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : kimms@pknu.ac.kr 051-620-1448

•본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

콘크리트는 여러 가지 재료를 배합하여 구조물을 형성하며, 건설공사의 기본소재로 구조물의 구조적 안정을 위해 제조와 시공과정에서 초기 품질확보가 매우 중요하다. 이러한 관점에서 볼 때 건설현장에서 콘크리트가 차지하는 비중은 아직까지도 주류를 이루고 있고, 사회간접자본에 투자증가로 인해 점차 대형화되는 추세로 본다면 콘크리트의 품질확보는 더욱더 중요하다고 할 수 있다. 그러나 최근 콘크리트의 품질에 중요한 역할을 갖는 원자재인 천연골재가 고갈되고, 자연환경보호법의 강화로 인해 채취마저 어려운 실정이다. 특히 천연강모래의 고갈, 해사의 채취금지 등으로 인해 최근에는 부순모래 사용이 급증하고 있고, 그에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)</sup>

콘크리트 구조물의 건설에 있어서 거푸집의 탈형, 동바리공의 해체, 양생종료 추정 등에 콘크리트의 강도를 추정할 필요가 있다. 강도 추정에 있어서 콘크리트 비파괴 시험으로 강도를 추정하는 방법들은 반발경도법, 초음파속도법, 관입저항법, 편인발법, 적산온도에 의한 방법 등 다양하게 제시되고 있으나 현장에서 가장 간편하게 많이 사용하는 것이 반발경도법과 초음파속도법 그리고 조합법이다. 그러나 강도 추정을 위한 제안식들은 시험조건과 환경의 차이에 따라 변동폭이 크고, 동일한 측정값을 나타내더라도 제안식 마다

그 편차가 커 정확한 강도 추정이 어려워 사용에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 특히 지역별로 생산된 골재들의 원암성분이 달라 기존 제안식을 여과 없이 사용한다는 것은 큰 오차를 간과한다고 볼 수 있다.<sup>(2)(3)</sup>

따라서 본 연구에서는 부산근교지역의 부순모래를 사용하여 부순모래 콘크리트를 제작한 다음 초음파속도법을 이용하여 실제 현장에서 가장 널리 사용하고 있는 기존 제안식과 비교·검토한 후 현장에서 가장 효과적으로 적용할 수 있는 강도 추정을 제안하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 실험에서는 비중이 3.14인 국내 A사에서 생산된 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다.

### 2.2 골재

골재는 부산근교에 위치한 김해지역 석산에서 생산된 부순자갈과 부순모래 : 입도조정용 낙동세사의 혼합비 7:3인 혼합모래를 사용하였으며 사용골재의 품질특성은 Table 2와 같다.<sup>(4)(5)(11)</sup>

Table 1 보통포틀랜드시멘트의 물리·화학적 특성

Physical properties			Chemical composition (%)					
Specific gravity	Ignition loss (%)	Insoluble residue (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
3.14	0.5~1.3	0.2~0.9	21.0	4.5	2.5	63.0	0.9	1.0
			~ 22.5	~ 6.0	~ 3.5	~ 66.0	~ 3.3	~ 2.0

Table 2 부순골재의 품질 특성

Kind	Item	F.M	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water abs. (%)	Abra sion (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Solid contents (%)	Flat or elongated particles (%)	Sound ness (%)
	Crushed gravel		7.12	2.7	1.3	12	1494	55	8
Crushed sand		4.14	2.3	2.3	-	1690	67	-	2.0
Mixed sand		3.41	2.6	1.9	-	1804	70	-	1.8

### 2.3 시편제작 및 양생

본 실험에 사용한 부순모래 콘크리트는 설계기준강도 21MPa과 30MPa, 슬럼프 15cm, 공기량 4.5%로 Table 3과 같이 배합설계를 실시하였다. 비빔은 50ℓ 강제식 믹서를 사용하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 초음파속도 측정기를 이용한 비파괴 시험을 위한 시편으로 30×30×30cm의 정방형 시편과 파괴 압축강도 측정을 위한  $\varnothing 10 \times 20$ cm인 압축강도용 원주형 공시체를 각각 양생조건과 재령별로 3개씩 제작하였다. 양생은 거푸집 해체 후 두 경우로 나누어 실시하였다. 먼저 수온조절이 가능한 양생조를 사용하여 수중양생을 실시하고 나머지는 실험실 내에서 기건양생을 실시하였다. 양생기간은 각각 7일(1주), 14일(2주), 28일(4주), 56일(8주)간 실시하였다.<sup>(7)(8)</sup>

### 2.4 실험방법

본 연구에서는 먼저 30×30×30cm 정방형 시험체를 이용하여 초음파속도를 측정하였고, 또한  $\varnothing 10 \times 20$ cm 압축강도용 원주형 공시체로 파괴 압축강도를 측정하였으며, 이들 측정값들을 이용하여 비파괴 압축강도 추정식을 제안하였다. 또한 정방형 시편과 원주형 공시체 품질의 균일성을 평가하기 위해 재령 28일(4주), 56일(8주)에  $\varnothing 10 \times 20$ cm의 원주형 코어를 채취하여 압축강도를 측정하였다.<sup>(9)(10)</sup>

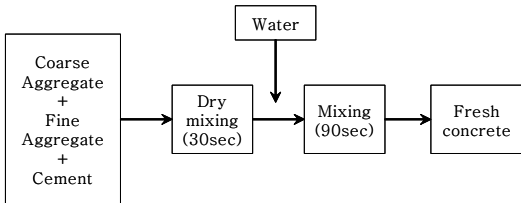


Fig. 1 부순모래 콘크리트의 제작과정

Table 3 부순모래 콘크리트의 배합설계

f <sub>ck</sub> (MPa)	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Slump (cm)	Air cont.(%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	R.S	C.S	G
21	25	45	43	15±2.5	4.5±1.5	200	368	212	494	994
30			40			185	417	196	457	1047

### 2.5 초음파속도법에 의한 강도 추정을 위한 적용식

기존의 초음파속도법에 의한 콘크리트 압축강도를 추정하기 위해 사용된 제안식은 일본, 미국, 루마니아, 헝가리 등 각국마다 매우 다양한 식들이 제안되어 있으나 본 실험에서는 Table 4와 같이 「KS F 2731 콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험방법」에 제시된 국내에서 주로 이용되고 있는 제안식을 이용하여 본 시편을 대상으로 압축강도용 원주형 공시체의 강도와 비파괴 강도 제안식과의 상관성을 비교하였다.<sup>(2)-(4)</sup>

Table 4 초음파속도법을 이용한 강도 추정에 사용된 제안식

Proposal	Equation
Architectural Institute of Japan	$F_c = 21.9V_p - 63.3$ (MPa)
Japan Institute of Materials	$F_c = 10.4V_p - 11.9$ (MPa)
J.Pysziak	$F_c = 9.44V_p^2 - 51.8V_p + 79.8$ (MPa)
谷川(Danikawa)	$F_c = 17.6V_p - 50.98$ (MPa)

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

제작된  $\varnothing 10 \times 20$ cm 압축강도용 원주형 공시체를 수중과 기건양생 재령 7일(1주), 14일(2주), 28일(4주), 56일(8주)에 압축강도를 측정하였다. 그 결과는 Table 5와 같으며 설계기준강도 21MPa과 30MPa의 두 경우 모두 수중양생시킨 공시체의 압축강도가 기건양생시킨 공시체의 압축강도보다 평균 5%정도 높게 나타났다.

Table 5 부순모래 콘크리트의 측정 결과

Curing Condition	$f_{ck}$ (MPa)	Age (Day)	Compressive strength (MPa)	Core strength (MPa)	Ultra-sonic velocity (km/s)
Water	21	7	19.1	-	4.47
			19.8		4.44
			20.3		4.48
		14	23.9	-	4.53
			21.3		4.56
			23.4		4.54
		28	26.5	26.4	4.57
			27.6	25.2	4.57
			28.9	25.8	4.63
		56	31.6	29.5	4.76
			31.3	30.8	4.73
			31.4	30.4	4.71
	30	7	29.0	-	4.56
			29.3		4.63
			27.5		4.56
		14	32.5	-	4.72
			34.4		4.72
			33.8		4.73
		28	35.6	32.6	4.71
			35.5	33.1	4.70
			36.1	33.3	4.74
		56	37.5	35.9	4.80
			36.5	35.9	4.76
			37.0	36.3	4.80
Air	21	7	17.7	-	4.32
			19.2		4.19
			19.3		4.27
		14	22.0	-	4.34
			21.6		4.37
			20.2		4.27
		28	26.4	24.0	4.33
			27.2	23.7	4.39
			24.7	24.1	4.41
		56	25.0	25.3	4.56
			27.4	25.0	4.47
			26.2	25.8	4.50
	30	7	21.6	-	4.36
			24.7		4.39
			23.0		4.38
		14	28.0	-	4.48
			30.9		4.58
			30.8		4.49
		28	35.5	32.4	4.58
			32.7	32.3	4.53
			34.0	32.7	4.54
		56	34.0	32.8	4.56
			35.4	33.7	4.66
			34.7	32.9	4.65

### 3.2 코어강도

초음파속도 측정용 시편에서 재령 28일(4주), 56일(8주)에  $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 코어를 채취하고 채취한 코어표본의 단부를 연마 후 압축강도를 측정하였다. 그 결과는 먼저 Table 5에 나타내었으며 역시 성형표본의 압축강도 측정결과와 동일하게 설계기준강도에 관계없이 두 경우 모두 수중양생 시편의 코어표본 압축강도가 기건양생 시편의 압축강도보다 평균 8%정도 높게 나타났다. 또한 성형표본에 비해 코어표본의 압축강도가 평균 5% 범위 내에 분포하는 것으로 나타나 이는 압축강도용 원주형 공시체와 비파괴 시험용 정방향 시편의 품질이 균일한 것으로 판단되며 이는 파괴시험에 의한 압축강도를 가지고 초음파속도와외 상관관계를 다루는데 이상이 없음을 알 수가 있다.

### 3.3 초음파속도

직접법  $L=30$ cm로 하여 초음파속도를 각 시편 당 10개소 측정한 결과의 평균은 Table 5와 같다. 양생 조건에 관계없이 재령에 비례하여 증가하였으며 수중양생 시편의 초음파속도가 기건양생 시편보다 평균 4.5%정도 높게 나타났다.

### 3.4 초음파속도법에 의한 압축강도 추정식

#### 3.4.1 회귀분석

본 연구에서 제안된 회귀분석식은 추정된 회귀식이 측정값을 얼마나 잘 설명하는지는 결정계수  $r^2$ 을 사용하였다. 또한 그 값이 1에 가까울수록 신뢰할 수 있는 것으로 하였다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum (Y_j - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

여기에서,  $r^2$  = 결정계수

$Y_j$  = 실제측정값

$\hat{Y}_j$  = 표본모형에서  $Y_j$ 의 추정값

$\bar{Y}$  =  $Y$ 의 평균값

단순회귀모형의 설정은 식 (2)로 가정하였으며,

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_j + \epsilon_j, j=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

여기에서,  $Y_j$  = 종속변수  $Y$ 의  $j$ 번째 관측값

$\beta_0, \beta_1$  = 모집단회귀 계수

$X_j$  = 독립변수  $X$ 의  $j$ 번째 관측값

$\epsilon_j$  =  $j$ 번째 확률오차항

$\beta_1$ 에 대하여는 F분산과 P값을 검증하였는데,

$$F = \frac{MSRG}{MSR} = \frac{SSRG/1}{SSR/n-2} \quad (3)$$

여기에서,  $MSRG$  = 회귀제곱평균

$MSR$  = 잔차제곱평균

$SSR$  = 잔차제곱합

$SSRG$  = 회귀제곱합

이고, 만약  $F \geq F_{\alpha(1, n-2)}$ 이면 귀무가설은 기각된다. 또한 P값은 단측검증인 경우에

$$P_r(T \leq t_0), t_0 = \frac{b_1}{S_{b_1}} \quad (4)$$

$$P_r(T \geq t_0)$$

임을 검증하였으며, 이때 P값이 유의수준  $\alpha$ 보다 적으면 귀무가설은 기각된다.<sup>(6)</sup>

#### 3.4.2 회귀분석 내용

비파괴 시험 측정결과와 재령 7, 14, 28, 56일의  $\phi 10 \times 20$ cm 압축강도용 원주형 공시체 압축강도에 대한 회귀분석 결과는 Table 6과 같다.

#### 3.4.3 회귀분석에 의한 압축강도 추정식

초음파속도와 성형표본의 압축강도를 회귀분석한 결과 상관계수는 수중양생의 2차 추정식  $F_c = -44.3Vp^2 + 459.6Vp - 1150.4$ 가 0.886으로 가장 높게 나타났으며, 표준오차 역시 수중양생의 2차 추정식이 2.02로 가장 낮게 나타났다. 추정강도와 파괴강도와의 오차율은 수중양생의 로그함수  $F_c = 231.4 \ln(Vp) - 325.56$ 이 5.59%로 가장 낮게 나타났다.

Table 6 회귀분석결과

Curing condition	Kind	Source	r square	Standard error	DF	SS	MS	F	Sig.
Water	Ultra-sonic velocity method	Regression	0.880 (0.875)	2.07	1	693.576	693.576	162.032	0.000
		Residual Error			22	94.171	4.280		
		Total			23	787.747			
Air	Ultra-sonic velocity method	Regression	0.840 (0.832)	2.30	1	610.401	610.401	115.307	0.000
		Residual Error			22	116.462	5.294		
		Total			23	726.863			

note) 1. ( ) = Adjusted r square.

Table 7 제안식의 상관계수

Curing Condition	Proposed equations (MPa)	Correlation coefficient
Water	$F_c = 50.0V_p - 202.4$	0.881
	$F_c = -44.3V_p^2 + 459.6V_p - 1150.4$	0.886
	$F_c = 231.4\ln(V_p) - 325.56$	0.882
Air	$F_c = 40.8V_p - 154.5$	0.840
	$F_c = 25.8V_p^2 - 188.52V_p + 354.0$	0.846
	$F_c = 180.7\ln(V_p) - 242.67$	0.838

Table 8 제안식의 표준오차 및 오차율

Curing Condition	Proposed equations (MPa)	Standard Error	Error rate (%)
Water	$F_c = 50.0V_p - 202.4$	2.07	5.60
	$F_c = -44.3V_p^2 + 459.6V_p - 1150.4$	2.02	5.63
	$F_c = 231.4\ln(V_p) - 325.56$	2.06	5.59
Air	$F_c = 40.8V_p - 154.5$	2.30	6.83
	$F_c = 25.8V_p^2 - 188.52V_p + 354.0$	2.26	6.60
	$F_c = 180.7\ln(V_p) - 242.67$	2.32	6.89

Table 7은 제안식들의 상관계수를 Table 8은 제안식들의 표준오차 및 오차율을 나타내었다.

#### 3.4.4 제안식과 기존식의 비교

초음파속도법에 의한 강도 추정식과 기존식을 시험값의 평균으로 비교한 결과 Fig. 2~3과 같으며 기존식의 표준오차와 오차율은 Table 9와 같다.

제안식들의 표준오차가 2.02~2.32, 오차율이 5.59~6.89인 것과는 달리 기존식들의 표준오차와 오차율이 3~4배가량 크게 나타났다. 이는 기존식이 천연골재를 사용한 콘크리트에 대한 강도 추정식이기 때문이며 부순모래 콘크리트의 강도추정에는 적합하지 않음을 알 수 있었다.

Table 9 기존식의 표준오차 및 오차율

Existing equations	Water		Air	
	Standard Error	Error rate (%)	Standard Error	Error rate (%)
Architectural Institute of Japan ( $F_c = 21.9V_p - 63.3$ )	8.71	29.17	7.23	26.26
Japan Institute of Materials ( $F_c = 10.4V_p - 11.9$ )	7.48	23.03	7.93	28.01
J.Pysziak ( $F_c = 9.44V_p^2 - 51.8V_p + 79.8$ )	12.23	42.06	8.52	31.90
谷川(Danikawa) ( $F_c = 17.6V_p - 50.98$ )	4.25	12.43	3.90	11.66

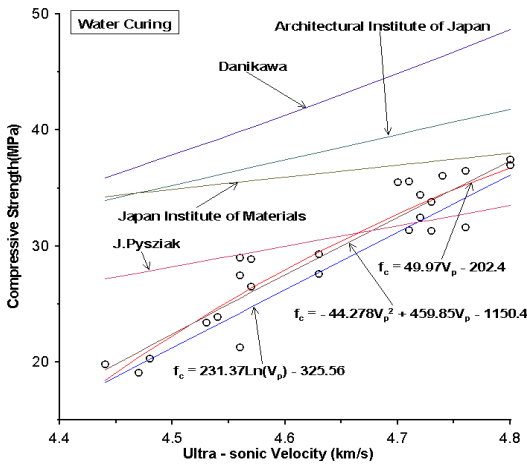


Fig. 2 기존식과 제안식의 비교(수중양생)

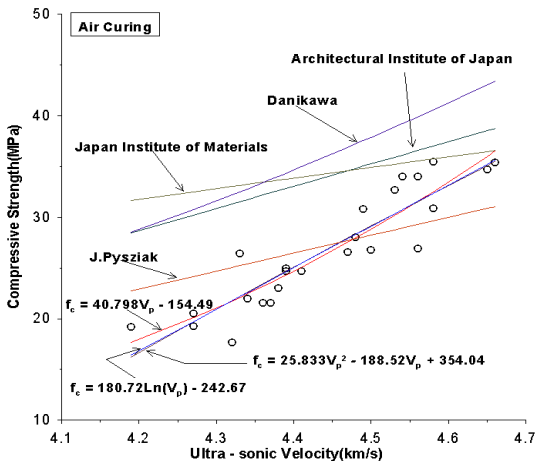


Fig. 3 기존식과 제안식의 비교(기건양생)

#### 4. 결론

본 연구는 부산근교 김해지역에서 생산된 부순골재를 사용한 부순모래 콘크리트를 제작하여 초음파속도법을 이용하여 압축강도를 추정한 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1차식은 수중양생의 경우  $F_c = 50.0V_p - 202.4$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.881$ , 표준오차는 2.07, 오차율 5.60%, 기건양생의 경우  $F_c = 40.8V_p - 154.49$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.840$ , 표준오차는 2.30, 오차

율은 6.83%를 나타내었다.

- 2) 2차식은 수중양생의 경우  $F_c = -44.3V_p^2 + 459.6V_p - 1150.4$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.886$ , 표준오차는 2.02, 오차율 5.63%, 기건양생의 경우  $F_c = 25.8V_p^2 - 188.52V_p + 354.0$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.846$ , 표준오차는 2.26, 오차율은 6.60%를 나타냄으로서 가장 낮은 표준오차와 오차율을 나타내었다.
- 3) 대수식은 수중양생의 경우  $F_c = 231.4\ln(V_p) - 325.56$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.882$ , 표준오차는 2.06, 오차율 5.59%, 기건양생의 경우  $F_c = 180.7\ln(V_p) - 242.67$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.838$ , 표준오차는 2.32, 오차율은 6.89%를 나타내었다.
- 4) 양생조건에 관계없이 실험식들의 표준오차가 2.02~2.32, 오차율이 5.59~6.89인 것과는 달리 기존식들의 표준오차와 오차율이 3~4배가량 크게 나타났다. 이는 기존식이 천연골재를 사용한 콘크리트에 대한 강도 추정식이기 때문이며 부순모래 콘크리트의 강도추정에는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 또한 실험식 중 2차식의 상관계수 및 표준오차 그리고 오차율이 가장 양호하게 나타났다.

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회편, "부순모래 및 부순모래 콘크리트", 1998. 6.
2. 김성열, "콘크리트 강도에 있어서 비파괴 검사의 신뢰도에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 경남대학교, 1995. 6.
3. 이의중 역, "콘크리트의 비파괴시험", 도서출판 골드, 1996. 6.
4. 엄치선, "부순골재를 사용한 콘크리트의 특성 및 활용방안", 석사학위논문, 부경대학교, 2004. 8.
5. 배원만, "부산근교에서 생산된 부순골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구", 석사학위논문, 부경대학교, 2005. 2.
6. 강금식, "현대 통계학", 박영사, 2003. 12.
7. 환친구, 반호영, 윤기원, 유현기, "부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합설계에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 제11권, 10호, 1995. 10.
8. 김생민, 임정호, 김동신, 최세규, "건설재료학", 기문당, 2003. 1.

- 
9. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 해설집", 기문당, 2004. 2.
  10. Adam Neville, "Properties of Concrete", 4rd Ed., Wiley, 1997.
  11. Ahmed E. Ahmed and Ahmed A. EI-Koued, "Properties of Concrete Incorporating Nature and Crushed Stone Very Fine Sand", ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, July-August. 1989, pp. 417-424.

(접수일자 : 2006년 8월 31일)