



## 부순모래 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 압축강도 추정에 관한 연구

김명식<sup>1)</sup> · 백동일<sup>1)\*</sup> · 김강민<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 건설공학부

## A Study on the Compressive Strength Prediction of Crushed Sand Concrete by Non-Destructive Method

Myung-Sik Kim<sup>1)</sup>, Dong-II Baek<sup>1)\*</sup>, and Kang-Min Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**ABSTRACT** Percentage that aggregate of materials that concrete composed about 70~80% of whole volume, therefore influence that quality of aggregate gets in concrete characteristics are very important. Schmidt hammer and ultra-sonic velocity method are commonly used for crushed sand concrete compressive strength test in a construction field. At present, various 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 present equations and destructive strength to test specimen, and find out which is a suitable equation for the construction site, a strength test was carried out destructive test by means of core sampling and traditional test. The experimental parameters were concrete age, curing condition, and strength level. It is demonstrated that the correlation behavior of crushed sand concrete strength in this study good due to the perform analysis of correlation between core, destructive strength and non-destructive strength.

**Keywords** crushed sand concrete, rebound method, ultra-sonic velocity method, combined method, curing condition

### 1. 서 론

경제 발전과 더불어 건설 분야도 급속하게 성장하고 있다. 국내에서는 사회간접자본에 대한 국가적인 투자가 급증함에 따라 거대한 해양 구조물, 장대교량, 다목적 댐, 초고층 건축물 등 부재가 큰 대형 구조물이 많이 건설되고 있다. 이러한 사회간접자본을 확충하기 위한 건설 부문의 투자는 급증하는 반면 건설에 사용되어지는 원자재인 여러 가지 천연자원은 고갈시대를 맞았다. 콘크리트용 골재로 주로 사용되고 있던 양질의 천연골재는 이미 고갈된 상태이다. 천연강모래의 급격한 고갈에 기인해 부순모래의 사용량이 급증하고 있어 부순모래를 사용한 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

일반적으로 콘크리트의 비파괴 시험으로 압축강도를 추정하는 방법으로는 반발경도법, 초음파속도법, 충격파법, 복합법 등이 있다. 이 중 시험 방법이 국제적으로 표준화되어 있고 간단하여 널리 사용되고 있는 슈미트해머를 이용한 반발경도법과 초음파속도를 이용한 초음파속도법, 그리고 이 두 가지를 조합한 복합법이 주로 사용되고 있다. 이러한 비파괴 시험에 의한 압축강도추정은

주로 일본에서 제안된 식들이 많이 사용되고 있다. 그러나 이들 제안식들은 시험 조건과 환경의 차이에 따라 변동성이 크므로 동일한 반발경도나 초음파속도를 나타내더라도 제안식마다 상이한 값을 나타내기 때문에 정확한 강도추정이 어려운 실정이다<sup>2,3)</sup>.

따라서 본 연구에서는 퇴적암류인 점판암 및 사암 등이 넓게 분포되어진 경상도 지역의 부산근교에서 생산된 부순자갈 및 부순모래에 입도조정용 낙동세사를 혼입한 혼합모래를 사용하여 부순모래 콘크리트를 제작한 다음 반발경도법과 초음파속도법을 이용하여 비파괴 시험을 실시하였다. 측정된 값은 실제 현장에서 가장 널리 사용하고 있는 각종 제안식과 비교 검토하여 부순모래 콘크리트 구조물의 압축강도 추정기술 향상을 위한 기초 자료로 삼고자 한다.

### 2. 사용 재료 및 배합설계

#### 2.1 사용 재료

##### 2.1.1 시멘트

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

\*Corresponding author E-mail : qt418@pknu.ac.kr  
Received August 28, 2006, Accepted October 23, 2006  
©2007 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Physical properties and Chemical Composition of OPC

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	21.0~22.5	4.5~6.0	2.5~3.5	63.0~66.0	0.9~3.3	1.0~2.0

2.1.2 골재

골재는 부산근교 김해지역의 석산에서 생산된 부순자갈과 부순모래 : 입도조정용 낙동세사의 혼합비 7:3인 혼합모래를 사용하였으며, 사용 골재의 품질 특성은 Table 2와 같다<sup>4,6)</sup>.

2.2 배합설계

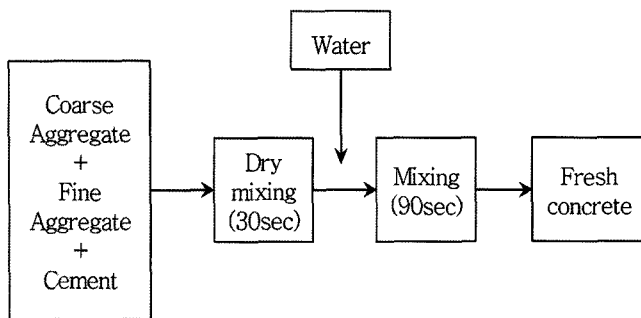
본 실험에 사용한 부순모래 콘크리트는 설계기준강도 21 MPa과 30 MPa, 슬럼프 15 cm, 공기량 4.5%로 Table 3과 같이 배합설계를 실시하였다<sup>7,8)</sup>.

3. 공시체 제작 및 시험 방법

3.1 공시체 제작 및 양생

3.1.1 콘크리트의 제조

비빔은 혼합용적 50l 강제식 믹서를 사용하였으며 다짐은 다짐봉을 사용하여 KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작 방법에 의거하여 수행하였다. Fig. 1은 부순모래 콘크리트의 제작 과정을 나타낸 모식도이다.



**Fig. 1** Production flow of crushed sand concrete

**Table 2** Physical properties of aggregates

Item kind	F.M	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water abs. (%)	Abrasion (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Solid contents (%)	Flat or elongated particles (%)	Soundness (%)
Crushed gravel	7.12	2.7	1.3	12	1494	55	8	3.2
Crushed sand	4.14	2.3	2.3	-	1690	67	-	2.0
Mixed sand	3.41	2.6	1.9	-	1804	70	-	1.8

**Table 3** Mix proportion of concrete

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	RS	CS	G
21	25	45	43	15±2.5	4.5±1.5	200	368	212	494	994
30			40			185	417	196	457	1,047

W : water, C : cement, RS : river sand, CS : crushed sand, G : gravel

3.1.2 공시체 제작

슈미트해머와 초음파속도 측정기를 이용한 비파괴 시험을 위한 시편으로 300×300×300 mm의 정방형 시편과 파괴 압축강도 측정을 위한 시편으로 Ø100×200 mm인 압축강도용 원주형 공시체를 제작하였다.

3.1.3 양생

양생은 거푸집 해체 후 두 경우로 나누어 실시하였다. 먼저 수온 조절이 가능한 양생조를 사용하여 수중양생을 실시하고 나머지는 실험실 내에서 기건양생을 실시하였다. 양생기간은 각각 7일(1주), 14일(2주), 28일(4주), 56일(8주)간 실시하였다.

3.2 시험 방법

본 연구에서는 먼저 300×300×300 mm 정방형 시편을 이용하여 반발경도와 초음파속도를 측정하였고, 또한 Ø100×200 mm 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 Ø100×200 mm의 원주형 코어를 채취하여 압축강도를 측정하였다<sup>9,10)</sup>.

3.2.1 비파괴 압축강도 추정을 위한 적용식

기존의 비파괴 시험법에 의한 콘크리트 압축강도를 추정하기 위해 사용되고 있는 제안식은 일본, 미국, 루마니아, 헝가리 등 각국마다 매우 다양한 식들이 제안되어 있다. 그러나 본 실험에서는 Table 4와 같이 「KS F 2730 콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도 시험 방법」과 「KS F 2731 콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험 방법」에 제안된 식을 이용하여 본 시편을

**Table 4** Existing equations

Kind	Proposal	Equation (MPa)
Rebound method (R)	Japan Institute of Materials	$F_c = 1.3R - 18.8$
	Tokyo	$F_c = 1.0R - 11.2$
	Architectural Institute of Japan	$F_c = 0.74R + 10.2$
	U.S Army	$F_c = -12.3 + 0.8R + 0.0095R^2$
	木村(Kimura)	$F_c = 0.956(0.987)R + (0.13t - 11.1)$
Ultra-sonic velocity method ( $V_p$ )	Architectural Institute of Japan	$F_c = 21.9V_p - 63.3$
	Japan Institute of Materials	$F_c = 10.4V_p - 11.9$
	J. Pysiak	$F_c = 9.44V_p^2 - 51.8V_p + 79.8$
	谷川(Danikawa)	$F_c = 17.6V_p - 50.98$
Combined	Architectural Institute of Japan	$F_c = 0.84R + 27.4V_p - 112$

note) Tokyo : The Tokyo building materials inspection center

$F_c$  = Prediction strength

R = Rebound value

$V_p$  = Ultra-sonic velocity

대상으로 압축강도용 원주형 공시체의 강도와 반발경도 법, 초음파속도법을 이용한 비파괴 강도 제안식과의 상관성을 비교하였다<sup>2,3,9)</sup>.

압축강도보다 평균 5%정도 높게 나타났다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 기본 실험 결과

###### 4.1.1 압축강도

제작된 Ø100×200 mm 압축강도용 원주형 공시체를 수중과 기건양생 재령 7일(1주), 14일(2주), 28일(4주), 56일(8주)에 각각 9개씩 총 144개의 성형표본을 제작하여 압축강도를 측정하였다. 그 측정 평균값은 Table 5와 같으며 설계기준강도 21 MPa와 30 MPa의 두 경우 모두 수중양생시킨 공시체의 압축강도가 기건양생시킨 공시체의

###### 4.1.2 코어강도

부순모래 콘크리트 300×300×300 mm의 정방형 시편을 제작하여 수중과 기건에서 양생시켜 재령 28일(4주), 56일(8주)에 Ø100×200 mm의 원주형 코어를 각각 9개씩 총 72개를 채취하고 채취한 코어의 단부를 연마 후 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법」에 의거하여 실시하였으며, 코어표본의 채취 및 관리에 관한 사항은 「KS F 2422 콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험 방법」에 의거하여 실시하였다. 또한 코어표본의 수침시간은 자동온도조절장치를 이용하여 20±3의 수중에서 40~48°C시간 양생 후 압축강도를 측정하였다. 그 측정 평균값을 먼저 Table 5에 나타내었으며 역시 성형표본의 압축강도 측정

**Table 5** Compressive strength test results of crushed sand concrete

Curing condition	$f_{ck}$ (MPa)	Age (day)	Compressive strength (MPa)										Core strength (MPa)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Water	21	7	19.4	19.1	18.9	20.0	19.7	19.6	20.2	19.5	21.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		14	23.6	24.0	24.1	22.0	21.3	20.6	23.4	24.0	22.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		28	26.1	26.8	26.6	27.9	27.8	27.1	29.3	28.3	29.1	26.2	26.8	26.3	26.6	24.7	24.3	26.1	25.5	25.8	-
		56	31.4	31.5	31.3	31.3	31.4	32.1	31.3	31.0	31.6	28.5	30.0	30.2	29.5	31.2	31.6	30.7	30.2	30.2	-
	30	7	29.3	28.7	29.0	28.9	28.9	30.1	28.1	27.5	26.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		14	33.0	32.7	31.8	33.7	34.8	34.7	33.8	33.7	33.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		28	36.1	36.0	34.7	34.9	34.9	36.7	36.0	36.1	35.9	31.1	34.3	32.5	33.1	32.5	33.7	32.0	34.1	33.9	-
		56	37.8	38.0	36.7	36.6	36.6	36.3	36.8	36.6	37.6	36.4	35.4	35.9	36.0	35.6	36.2	36.0	35.7	37.1	-
Air	21	7	18.1	17.7	17.3	18.9	18.8	19.9	19.8	19.2	18.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		14	21.5	22.3	22.2	22.0	21.7	21.1	21.1	20.4	20.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		28	25.9	26.7	26.6	27.0	27.2	27.4	25.0	25.1	24.0	24.5	23.6	23.9	22.9	23.8	24.4	23.7	24.7	23.9	-
		56	25.0	25.1	24.9	27.1	26.9	28.2	27.0	26.5	25.1	24.2	25.3	26.4	24.7	24.3	26.0	25.4	26.6	25.3	-
	30	7	21.3	22.0	21.5	23.9	24.9	25.3	23.0	22.7	23.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		14	28.1	28.1	27.8	30.8	31.3	30.6	31.3	30.5	30.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		28	36.1	35.8	34.6	33.0	33.1	32.0	34.0	35.0	33.0	31.6	33.4	32.2	32.9	31.1	33.1	31.9	33.5	32.6	-
		56	33.9	33.8	34.3	35.0	36.0	35.2	35.1	34.3	34.7	32.7	32.7	33.1	32.8	34.5	33.8	31.6	34.6	32.4	-

결과와 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 낮게 분포하는 것으로 나타나 이는 압축강도용 원주형 공시체와 비파괴 시험용 정방향 시편의 품질이 균일한 것으로 판단되며 이는 파괴 시험에 의한 압축강도를 이용하여 초음파속도와와의 상관 관계를 다루는데 이상이 없음을 알 수가 있다.

#### 4.1.3 반발경도

재령계수에 대한 보정을 제외한 타격 방향에 대한 보정과 수중양생시킨 공시체에 한하여 습윤상태에 따른 보정을 실시하였다<sup>11)</sup>. 그 결과는 Table 6과 같다. 반발경도는 양생 조건에 관계없이 재령에 비례하여 증가하였으며 수중양생 시편의 반발경도가 기건양생 시편보다 평균 5% 정도 높게 나타났다.

#### 4.1.4 초음파속도

직접법으로  $L=300$  mm로 하여 초음파속도를 측정 한 결과는 Table 6과 같다. 역시 반발경도와 마찬가지로 양생조건에 관계없이 재령에 비례하여 증가하였으며 수중양생 시편의 초음파속도가 기건양생 시편보다 평균 4.5% 정도 높게 나타났다.

### 4.2 회귀분석 결과

본 연구에서 제안된 회귀분석식은 타당성을 검증하기 위해 회귀계수에 대한 t-검정, 분산분석을 위한 F-검정을 실시하였다. 또한 추정된 회귀식이 측정값을 얼마나 잘 설명하는지는 결정계수  $R^2$ 를 사용하여 그 값이 1에 가까울수록 신뢰할 수 있는 것으로 하였다<sup>12)</sup>. 반발경도와 초음파속도에 의한 비파괴 시험 측정 결과와 재령 7일(1주), 14일(2주), 28일(4주), 56일(8주)의  $\varnothing 100 \times 200$  mm 압축강도용 원주형 공시체 압축강도에 대한 회귀분석 결과는 Table 7과 같다.

### 4.3 비파괴 시험에 의한 압축강도 추정식

#### 4.3.1 반발경도법에 의한 압축강도 추정식

제작된  $300 \times 300 \times 300$  mm의 정방향 시편을 수중과 기건양생 재령 7일, 14일, 28일, 56일에 슈미트해머를 이용해 정방향 시편의 육면 중 사면에 타격점 상호간의 간격 30 mm를 표준으로 하며, 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도를 측정하였다. 이렇게 얻은 반발경도에 재령계수에 대한 보정을 제외한 타격 방향에 대한 보정과 수중양생시킨 공시체에 한하여 습윤상태에 따른 보정을 하여 회귀분석 결과 수중양생의 경우  $F_c = 1.40R - 19.20$ 으로서 상관계수  $R^2 = 0.87$ , 표준편차는 2.20, 오차율 7.03%를 나타내었으며, 기건양생의 경

**Table 6** Non-destructive results of crushed sand concrete

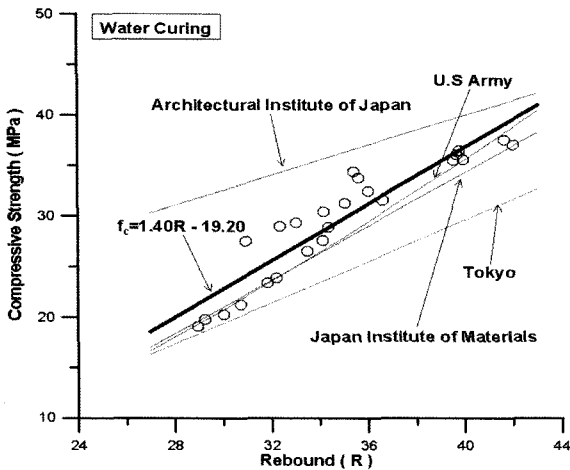
Curing condition	$f_{ck}$ (MPa)	Age (day)	Rebound index (R)	Ultra-sonic velocity (km/s)
Water	21	7	29.0	4.47
			29.3	4.44
			30.0	4.48
		14	31.8	4.53
			30.7	4.56
			32.2	4.54
		28	34.4	4.57
			33.5	4.57
			34.1	4.63
		56	36.6	4.76
			35.1	4.73
			34.2	4.71
	30	7	32.4	4.56
			33.0	4.63
			30.9	4.56
		14	36.0	4.72
			35.4	4.72
			35.6	4.73
		28	39.9	4.71
			39.5	4.70
			39.7	4.74
		56	41.7	4.80
			41.7	4.76
			42.0	4.80
Air	21	7	23.5	4.32
			24.7	4.19
			24.7	4.27
		14	32.8	4.34
			33.1	4.37
			30.9	4.27
		28	33.5	4.33
			32.9	4.39
			32.7	4.41
		56	33.5	4.56
			34.3	4.47
			33.5	4.50
	30	7	33.9	4.36
			34.6	4.39
			34.1	4.38
		14	35.8	4.48
			34.4	4.58
			34.3	4.49
		28	37.0	4.58
			36.1	4.53
			36.1	4.54
		56	37.0	4.56
			37.0	4.66
			36.4	4.65

우  $F_c = 1.20R - 12.95$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.65$ , 표준편차는 3.40, 오차율은 11.49%를 나타냈다. Figs. 2~3은 양생 조건에 따라 기존식들과 제안식을 나타내고 있는데 천연골

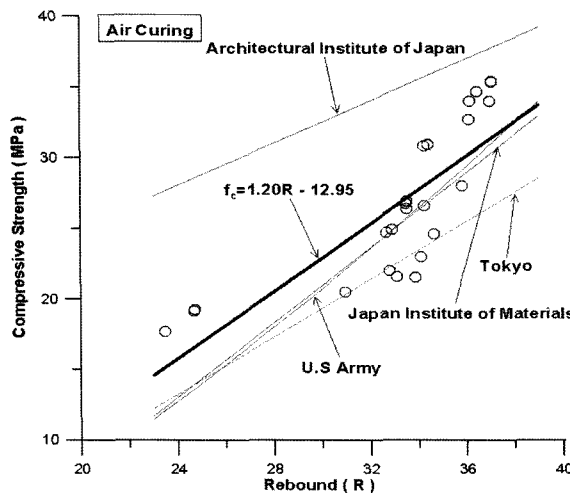
**Table 7** The results of regression analysis

Curing condition	Kind	Source	r square	Standard error	Error rate (%)	DF	SS	MS	F	Sig.
Water	Rebound method	Regression	0.865 (0.859)	2.20	7.03	1	681.576	681.576	141.231	0.000
		Residual error				22	106.171	4.826		
		Total				23	787.747			
	Ultra-sonic velocity method	Regression	0.880 (0.875)	2.07	5.60	1	693.576	693.576	162.032	0.000
		Residual error				22	94.171	4.280		
		Total				23	787.747			
	Combined method	Regression	0.928 (0.921)	1.65	4.94	2	730.819	365.410	134.795	0.000
		Residual error				21	56.928	2.711		
		Total				23	787.747			
Air	Rebound method	Regression	0.651 (0.635)	3.40	11.49	1	472.889	472.889	40.963	0.000
		Residual error				22	253.974	11.544		
		Total				23	726.863			
	Ultra-sonic velocity method	Regression	0.840 (0.832)	2.30	6.83	1	610.401	610.401	115.307	0.000
		Residual error				22	116.462	5.294		
		Total				23	726.863			
	Combined method	Regression	0.863 (0.850)	2.18	8.79	2	627.100	313.550	66.002	0.000
		Residual error				21	99.763	4.751		
		Total				23	726.863			

note) ( ) = Adjusted r square, DF : Degree of freedom, SS : Sum square, MS : Mean square, Sig : Significance F



**Fig. 2** Comparison of proposed equation by rebound method (water curing)

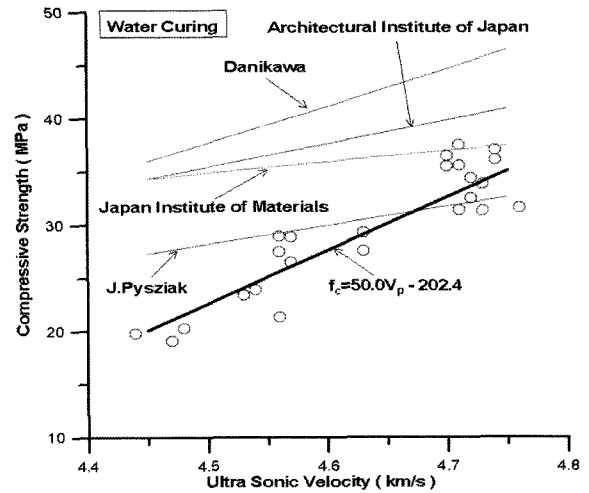


**Fig. 3** Comparison of proposed equation by rebound method (air curing)

재 콘크리트에 사용되어온 기존식들은 본 연구에서 도출된 부순모래 콘크리트의 반발경도법에 의한 비파괴 강도 추정식과 차이를 보이고 있다. 그러므로 사용 골재에 따라 그에 적절한 비파괴 강도 추정식이 사용되어야 할 것으로 판단되어진다.

4.3.2 초음파속도법에 의한 압축강도 추정식

제작된 300×300×300 mm의 정방형 시편을 역시 수중과 기건양생 재령 7일, 14일, 28일, 56일에 초음파속도 측정기로 정방형 시편의 육면 중 사면을 이용해 직접법으로 L=300 mm로 하여 초음파속도를 측정하였다. 이렇게 얻어진 초음파속도로 회귀분석을 실시한 결과 수중양생 경우  $F_c = 50.0V_p - 202.4$ 이었으며 상관계수  $R^2 = 0.88$ , 표준편차는 2.07, 오차율 5.60%를 나타냈다. 또한 기건



**Fig. 4** Comparison of proposed equation by ultra-sonic velocity method (water curing)

## 5. 결 론

퇴적암류인 점판암 및 사암 등이 넓게 분포되어진 경상도 지역의 부산근교에서 생산된 부순골재를 사용한 부순모래 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험식에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 슈미트해머를 이용한 반발경도법에 의한 강도추정 결과 수중양생의 경우 제안식  $F_c = 1.40R - 19.20$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.87$ , 표준편차는 2.20, 오차를 7.03%, 기건양생의 경우 제안식  $F_c = 1.20R - 12.95$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.65$ , 표준편차는 3.40, 오차는 11.49%로 나타났다.
- 2) 초음파 속도를 이용한 초음파 속도법에 의한 강도 추정 결과 수중양생의 경우 제안식  $F_c = 50.0V_p - 202.4$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.88$ , 표준편차는 2.07, 오차를 5.60%, 기건양생의 경우 제안식  $F_c = 40.80V_p - 154.49$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.84$ , 표준편차는 2.30, 오차는 6.83%로 나타났다.
- 3) 복합법에 의한 강도추정 결과 기존식은 매우 큰 표준편차를 나타냈으나 본 실험에서 얻은 제안식은 수중양생의 경우  $F_c = -122.49 + 26.59V_p + 0.83R$ 로서 상관계수  $R^2 = 0.93$ , 표준편차 1.65, 오차율 4.94%로 반발경도법이나 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우 보다 상관도와 오차율이 상당히 개선되었으며, 기건양생의 경우  $F_c = -53.75 + 12.31V_p + 0.78R$ 이며 상관계수  $R^2 = 0.86$ , 표준편차 2.18, 오차율 8.79%로 역시 상관도와 오차율의 개선을 가져왔다.
- 4) 따라서 천연골재 콘크리트에 사용되어온 기존식들은 본 연구에서 도출한 부순모래 콘크리트의 비파괴 압축강도 추정식과 많은 차이를 보이고 있으므로 사용골재에 따라 그에 적합한 비파괴 강도 추정식이 사용되어야 할 것으로 판단되어진다.

## 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 부순모래 및 부순모래 콘크리트, 한국콘크리트학회, 1998. 6, pp.15~125.
2. 김성열, 콘크리트 강도에 있어서 비파괴 검사의 신뢰도에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 경남대학교, 1995. 6.
3. 이의중 역, 콘크리트의 비파괴시험, 도서출판 골드, 1996. 6, pp.121~147.
4. 염치선, 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. Ahmed, E. Ahmed, and Ahmed, A. El-Koued, "Properties of Concrete Incorporating Nature and Crushed Stone Very Fine Sand", *ACI Materials Journal*, Vol.86, No.4, 1989, pp.417~424.
7. 한친구, 반호영, 윤기원, 유현기, "부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합설계에 관한 실험적 연구", 대

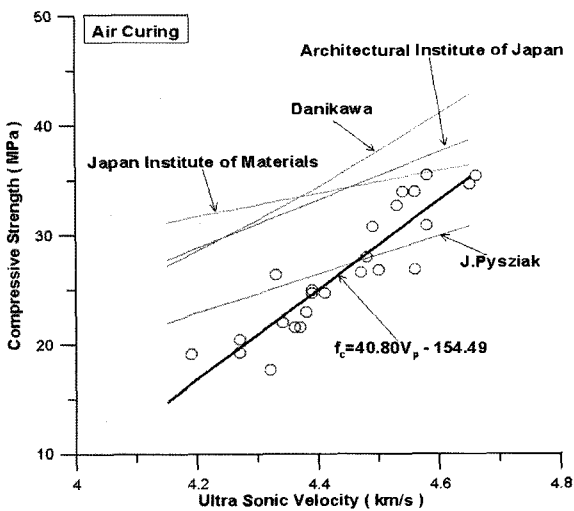


Fig. 5 Comparison of proposed equation by ultra-sonic velocity method (air curing)

양생의 경우  $F_c = 40.80V_p - 154.49$ 이었으며 상관계수  $R^2 = 0.84$ , 표준편차는 2.30, 오차를 6.83%를 나타냈다. Figs. 4~5는 양생조건에 따라 기존식들과 제안식을 나타내고 있다. 이 역시 반발경도법에 의한 압축강도 추정과 마찬가지로 천연골재 콘크리트에 사용되어온 기존식들은 본 연구에서 도출된 부순모래 콘크리트의 초음파속도법에 의한 비파괴 강도 추정식과 차이를 보이고 있다. 따라서 사용골재에 따라 그에 적절한 비파괴 강도 추정식이 사용되어야 할 것으로 판단되어진다.

### 4.3.3 복합법에 의한 압축강도 추정식

수중과 기건양생 재령 7일, 14일, 28일, 56일에 반발경도와 초음파속도를 측정하였다. 이렇게 얻어진 반발경도와 초음파속도로 중회귀분석을 실시한 결과 제안식은 수중양생의 경우  $F_c = -122.49 + 26.59V_p + 0.83R$ 이며 상관계수  $R^2 = 0.93$ , 표준편차 1.65, 오차율 4.94%를 나타냄으로서 반발경도법이나 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우 보다 상관도와 오차율이 상당히 개선되었으며 기건양생의 경우 역시  $F_c = -53.75 + 12.31V_p + 0.78R$ 이며 상관계수  $R^2 = 0.86$ , 표준편차 2.18, 오차율 8.79%로 상관도와 오차율이 개선됨을 알 수 있었다. Table 8은 반발경도법과 초음파속도법 그리고 복합법을 이용한 부순모래 콘크리트의 강도 추정 제안식을 나타내었다.

Table 8 Proposed equations of crushed sand concrete

Kind	Curing condition	Equation (MPa)
Rebound method (R)	Water	$F_c = 1.40R - 19.20$
	Air	$F_c = 1.20R - 12.95$
Ultra-sonic velocity method ( $V_p$ )	Water	$F_c = 50.0V_p - 202.4$
	Air	$F_c = 40.80V_p - 154.49$
Combined method	Water	$F_c = -122.49 + 26.59V_p + 0.83R$
	Air	$F_c = -53.75 + 12.31V_p + 0.78R$

- 한건축학회논문집, 11권, 10호, 1995. 10, pp.389~395.
8. 한천구, “콘크리트의 특성과 배합설계”, 기문당, 1998. 7, pp.20~35.
  9. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서 해설집”, 기문당, 2004. 2, pp.15~161.
  10. Adam Neville, *Properties of Concrete*, 4rd Ed., Wiley, USA, 1997, pp.581~641.
  11. 김종수, 김명식, 최신토건재료실험, 형설출판사, 2002. 8, pp.171~174.
  12. 강금식, 현대 통계학, 박영사, 2003. 12, pp.372~544.

---

**요 약** 콘크리트는 전체 체적의 70~80%가 골재로 이루어져 있다. 따라서 골재의 품질은 콘크리트 특성에 지대한 영향을 미친다. 현재 건설 현장에서는 부순모래 콘크리트의 비파괴 강도 추정을 일반적으로 슈미트해머를 이용한 반발경도법이나 초음파를 이용한 초음파속도법 그리고 둘을 조합한 복합법을 이용하고 있으며 기존의 천연골재를 사용한 콘크리트에 의해 얻어진 여러 가지 제안식들에 적용시켜 추정하고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 전형적인 파괴 시험과 코어 채취 그리고 반발경도법과 초음파속도법을 이용하여 부순모래 콘크리트의 강도 추정식을 제안하고자 하였다. 실험의 변수는 양생 재령과 양생 조건 그리고 콘크리트의 설계기준강도이다. 그 결과 본 연구에서 얻은 제안식이 기존식에 비해 모든 측면에서 양호한 것으로 나타나 실제 건설 현장의 부순모래 콘크리트 구조물의 평가 기술 향상에 기여할 것으로 사려 된다.

**핵심용어** : 부순모래 콘크리트, 반발경도법, 초음파속도법, 복합법, 양생 조건