

# 비파괴 시험에 의한 재생골재 콘크리트의 압축강도 평가

## An Evaluation of the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete by the Non-Destructive Testing

정 현 수\*

Chung, Heon-Soo

### Abstract

The objective of this study is to evaluate the compressive strength of recycled aggregate concrete by the non-destructive testing. Main experimental variables were the replacement level of recycled aggregate and blast-furnace slag, which were divided into two series according to recycled aggregate maximum size. Test results showed that a recycled aggregate had a significant influence on the non-destructive testing results, such as rebound number, Ultrasonic pulse velocity, and frequency. A prediction model of compressive strength considering the replacement level of recycled aggregate was suggested by multi-regression analysis and was compared with test results.

키워드 : 비파괴 시험, 재생골재 콘크리트, 압축강도, 다중회귀분석

Keywords : non-destructive testing, recycled aggregate concrete, compressive strength, multi-regression analysis

## 1. 서 론

재생골재를 사용한 콘크리트는 폐콘크리트 처리난 및 천연골재 수급난 해결뿐만 아니라 환경보호 등의 여러 이점으로 인해 그 사용성에 대한 많은 관심들과 함께 관련된 연구도 급증하고 있다. 이들 관련연구들은 재생콘크리트의 역학적 성능을 평가하고 개선을 위한 배합방법들을 모색함으로써 재생콘크리트 활용성을 높이는데 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 하지만 폐콘크리트의 재생골재로의 이용율은 19.5%로서 아직도 매우 낮다.<sup>13</sup> 재생골재 콘크리트의 압축강도 및 내구성 평가에 대한 간편하고 신뢰성 있는 자료들의 확보는 이들의 활용성을 높이는 한 대안이 될 것이다.

콘크리트의 압축강도를 간편하게 평가할 수 있는 방법으로는 반발경도법 및 초음파속도법 등의 비파괴시험법을 들 수 있을 것이다. 비파괴시험은 구조체의 손상을 최소화하고 보수, 보강 시 중요한 자료로 활용될 수 있다. 하지만 비파괴시험에 의한 콘크리트의 압축강도 평가는 대부분 천연골재를 이용한 보통콘크리트에서 수행되었으며 재생골재 콘크리트에서는 김무한 등<sup>3</sup>과 이수용 등<sup>10</sup>의 연구로 매우 제한적이다. 뿐만 아니라 비파괴시험에 의한 콘크리트의 역학적 성능 평가 모델은 대부분 외국의 시험식을 인용하고 있어 골재, 시멘트 및 혼화제 등 사용재료가 다른 점을 고려할 때 재생골재 콘

크리트에 적용할 때 그 적합성을 검증할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 쉽게 접할 수 있는 계측기들을 이용하여 비파괴 시험에 의한 재생골재 콘크리트의 압축강도를 파악하고 각 제안모델들의 적용성을 평가하는 것이다. 또한 다중회귀분석에 의해 재생골재 콘크리트에서 적용할 수 있는 비파괴 압축강도 평가모델을 제시하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 시험체 계획

주요 실험변수는 재생조골재 치환율( $R_{RG}$ ), 재생조골재 최대직경( $d_{RA}$ ), 고로슬래그 치환율( $R_{GS}$ )이다. 재생조골재 치환율은 0%, 15%, 30%, 50%, 75% 및 100%이다. 재생조골재 최대직경은 25mm와 40mm이다. 고로슬래그 치환율은 10%와 20%이다. 재생조골재의 치환율은 전체 조골재의 용적에 대한 재생조골재의 용적의 비로 하였다.

천연 조세골재를 사용하였을 때 재령 28일의 목표강도 50MPa를 기준으로 배합설계를 작성하였다. 배합직후의 목표 공기량은  $4.0 \pm 0.5\%$ 로 하였다. 이에 따른 물-결합재비( $W/B$ )와 단위수량( $W$ )을 각각 45%와  $175\text{kgf/m}^3$ 로 일정하게 하였다. 새골재율도 40%로 일정하게 하였다.

이상에서 설명한 물-결합재비와 단위수량 및 변수들의 조합에 따라 작성된 설계배합표를 표 1에 나타내었다. 재생 조골재의 최대직경이 25mm와 40mm일 때 각각 T-series와 F-series로 구분하였다.

\* 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사

이 연구는 2004년도 건설핵심기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되었음.

## 2.2 사용재료의 특성

시멘트 (C)는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고로슬래그 (BS)는 분말도가 4,209cm<sup>2</sup>/g인 광양산을 사용하였다.

표 1. 설계배합표

specimen*	d <sub>RA</sub> (mm)	R <sub>RG</sub> (%)	R <sub>BS</sub> (%)	W/B	S/A	단위용적중량(kgf/m <sup>3</sup> )						
						W	C	BS	S	G	RG	
T0-0	25	0	0	0.45	0.4	175	417	0	676	1049	0	
T0-10		0	10				375	42	667	1035	0	
T0-20		0	20				333	83	658	1022	0	
T15-0		15	0				417	0	676	892	137	
T30-0		30	0				417	0	676	734	274	
T30-10		30	10				375	42	667	725	271	
T30-20		30	20				333	83	658	715	267	
T50-0		50	0				417	0	676	525	457	
T50-10		50	10				375	42	667	518	451	
T50-20		50	20				333	83	658	511	445	
T75-0		75	0				417	0	676	262	686	
T100-0		100	0				417	0	676	0	914	
F15-0		40	15				0	417	0	676	892	135
F30-0			30				0	417	0	676	734	269
F30-10			30				10	375	42	667	725	271
F30-20			30				20	333	83	658	715	267
F50-0	50		0	417	0	676	525	449				
F50-10	50		10	375	42	667	518	451				
F50-20	50		20	333	83	658	511	445				
F75-0	75		0	417	0	676	262	674				
F100-0	100		0	417	0	676	0	898				

\*□ 0-0

고로슬래그 치환율: 0(0%), 10(10%), 20(20%)  
재생조골재 치환율: 0(0%)~100(100%)  
재생조골재 최대직경: T(25mm), F(40mm)

표 2. 골재의 물리적 성질

종류	항목	비중	흡수율 (%)	조립율	단위용적 중량 (kgf/l <sup>3</sup> )	실적율 (%)
세골재 (S)		2.55	1.21	2.46	1520	59.6
	천연조골재 (G)	2.64	0.79	7.04	1439	54.5
재생조골재 (RG)	25mm	2.29	5.6	7.43	1129	49.3
	40mm	2.26	5.3	7.98	1084	47.9

재생조골재는 C사에서 조 크러셔에 의해 생산되고 있는 것으로서 유리, 아스팔트 등의 불순물들을 제거하고, 최대직경 및 일정한 입도분포를 위해 체가름 하였다. 표 2에는 사용된 골재들의 물리적 성질을 나타내었다. 재생조골재의 품질은 KS 기준의 3등급에 해당되었다.

고성능 감수제는 H사에서 생산되는 비중 1.2의 폴리카본 산계를 이용하였다.

## 2.3 측정 및 평가방법

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 따른 파괴시험, 반발경도법과 같은 타격법, 초음파 속도를 측정하는 음속법 등에 의해 각각 평가하였다. KS F 2405에 의한 압축강도( $f_{ck}$ )는

1,500kN 용량의 만능재료 시험기에 의해 평가하였다. 편심의 영향을 배제하기 위하여 초기 50kN까지 가력 후 시험체 양측에 부착한 게이지 값을 통하여 편심의 작용을 검토하였다. 편심이 작용한 경우에는 가력면을 재연마하고 회반죽 등을 이용하여 보정하였다.

반발경도법에 의한 압축강도( $(f_{ck})_R$ )는 슈미트 햄머를 이용하여 반발도(R)와 압축강도와 사이에 특정한 상관관계가 있는 실험적 경험을 기초로 하였다. 슈미트 햄머는 보통콘크리트용인 NR형을 이용하였다. 반발도를 측정하기 위한 공시체는 상하부면으로부터 70mm씩 되는 부분을 6등분 한 중앙부를 8등분하여 표면처리를 하였다. 반발도는 표면처리를 한 공시체를 만능재료 시험기에 응력 5MPa로 고정된 후 타격각도 0° 인 수평타격으로 20회 측정 후 그 평균값으로 하였다.

반발도에 의한 압축강도는 현재 국내에서 많이 활용되는 일본재료학회와 일본건축학회<sup>17)</sup>에서 각각 제안된 다음 식 (1) 및 식 (2)와 김무한 등<sup>3)</sup> 및 지남용 등<sup>11)</sup>의 제안식인 식 (3) 및 식 (4)에 의해 평가, 비교하였다. 이들 식들은 천연골재를 사용한 보통강도 콘크리트의 실험결과에 근거한 경험식들이다.

$$(f_{ck})_R = 1.274R - 18 \quad (1)$$

$$(f_{ck})_R = 0.715R + 9.8 \quad (2)$$

$$(f_{ck})_R = 1.13R - 0.001R^2 - 0.149(W/C) - 1.09 \quad (3)$$

$$(f_{ck})_R = 0.902R + 0.98 \quad (4)$$

여기서  $(f_{ck})_R$ 는 반발경도에 의한 압축강도(MPa)를, R는 반발도, W/C는 물시멘트비를 각각 나타낸다.

일반적으로 초음파 속도는 골재의 형태 및 등급에 의해서도 영향을 받는다. 재생골재 콘크리트에서 초음파 속도와 압축강도의 관계를 평가하기 위하여 Pundit 장치에 의해 직접법으로 실험하였다. 변환기와 콘크리트 접촉면은 그리이스를 사용하여 coupling이 음향적으로 양호하게 작용될 수 있도록 하였다. 초음파 속도(V)는 측정된 전파시간에 대한 시험체 길이의 비로서 산정하였다.

초음파 속도에 의한 강도 평가식은 김무한 등<sup>3)</sup>에 의해 제시된 식 (5) 및 지남용 등<sup>11)</sup>에 의해 제시된 식 (6)에 의해 평가되었다.

$$(f_{ck})_V = -134.4V + 22.78V^2 - 0.207(W/C) + 212.2 \quad (5)$$

$$(f_{ck})_V = 20.65V - 59.6 \quad (6)$$

여기서  $(f_{ck})_V$ 는 반발경도에 의한 압축강도(MPa)를, V는 초음파 속도(km/sec)를 각각 나타낸다.

초음파 속도와 압축강도의 상관성은 반드시 높지 않기 때문에 강도평가로서 한계가 있다. 일반적으로 강도평가의 정확도를 높이기 위하여 슈미트햄머에 의한 반발경도법과 초음파법의 양자를 병행하는 복합법을 사용한다.

복합법에 의한 압축강도 평가는 일본건축학회<sup>17)</sup>, 김무한 등<sup>3)</sup>, 지남용 등<sup>11)</sup>에 의해 각각 제안된 식 (7), 식 (8) 및 식 (9)에 의해 평가되었다.

$$(f_{ck})_C = 0.8R + 26.35V - 107.2 \quad (7)$$

$$(f_{ck})_C = 0.656R + 9.88V - 0.194(W/C) - 21.89 \quad (8)$$

$$(f_{ck})_C = 0.657R + 17.93V - 67.82 \quad (9)$$

여기서  $(f_{ck})_C$ 는 복합법에 의한 압축강도(MPa)를 나타낸다.

동탄성계수 평가는 M사에서 제작한 기구를 통해 공명주파수 실험을 하였다. 1차공명 진동수는 oscilloscope에 의해 정확히 측정하였다. 공명주파수 시험에 의한 동탄성계수는 식(10)에 의해 산정되었다.

$$E_d = 4f_L^2 L^2 \rho \quad (10)$$

여기서  $f_L$ 은 1차 공명진동수(kHz)를,  $L$ : 공시체 길이(m)를,  $\rho$ 는 밀도(kgf/m<sup>3</sup>)를 각각 나타낸다.

동탄성계수법에 의한 압축강도 평가는 김무한 등<sup>3)</sup>의 제안식 (11)을 이용하였다.

$$(f_{ck})_E = -21.15E_d + 6.658E_d^2 - 0.122(W/C) + 28.93 \quad (11)$$

여기서  $(f_{ck})_E$ 는 동탄성계수법에 의한 압축강도(MPa)를 나타낸다.  $E_d$ 는  $\times 10^{-4}$ 을 적용한다.

### 3. 실험결과 및 분석

표 3에는 재령 56일에서 각 시험체의 밀도( $\rho$ ), 반발도( $R$ ), 초음파 속도( $V$ ), 가로진동1차공명진동수( $f_L$ ), 반발도에 의한

압축강도( $(f_{ck})_R$ ), 초음파법에 의한 압축강도( $(f_{ck})_V$ ), 복합법에 의한 압축강도( $(f_{ck})_C$ ), 동탄성계수법에 의한 압축강도( $(f_{ck})_E$ ) 등을 나타내었다. 또한 실제 압축강도( $f_{ck}$ )인 실험값 대비 비파괴시험에 의해 평가된 압축강도의 제안값의 비는 지면관계 상 김무한 등과 지남용 등의 제안모델에 의한 비교 값만 나타내었다.

#### 3.1 반발도법에 의한 압축강도

그림 1에는 재생조골재 치환율( $R_{GS}$ )과 실제강도에 대한 반발도법에 의한 압축강도 비( $(f_{ck})_C/f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 반발도법에 의해 강도를 예측하는 기존의 제안식들에 의해 평가된 압축강도는 실제 강도의 80% 이하로 매우 과소평가 되고 있었다. 또한 일본재료학회 제안식에 의한 압축강도 비는 재생조골재 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이는 반면 다른 제안모델들은 재생조골재 치환율에 관계없이 일정한 수준을 보였다. 뿐만 아니라 반발도에 의해 평가된 압축강도비는 재생 조골재 최대직경이 클수록 그리고 고로슬래그가 첨가된 시험체에서 높게 있었다.

그림 2에는 반발도와 식 (1)~식 (4)의 제안모델에 의한 압축강도의 관계를 나타내었다. 식 (2)에 의한 압축강도 평가모델이 반발도의 영향을 가장 적게 반영하고 있었다. 즉 그림 1과 함께 비교해 볼 때 반발도의 영향을 가장 적게 반영하는 식 (2)에 의해 압축강도가 평가될 때 실제 압축강도와의 편차가 가장 작게 나타났다. 따라서 반발도에 의한 재생골재 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위해서는 단순히 반발도만을 고려하기 보다는 재생 조골재의 치환율 및 최대직경의 영향이 반영되어야 할 것이라 판단된다. 김무한<sup>5)</sup>, 이수용 등<sup>10)</sup>에 의해 지적된바와 같이 동일 압축강도일지라도 재생 조골재

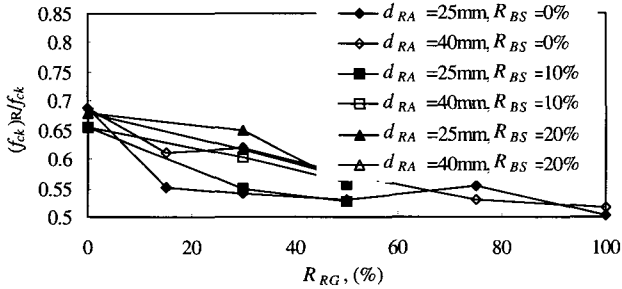
표 3. 실험결과 일람

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho$ (kgf/m <sup>3</sup> )	$R$	$V$ (km/s)	$f_L$ (Hz)	$E_d$ (MPa)	$(f_{ck})_R$ (MPa)				$(f_{ck})_V$ (MPa)		$(f_{ck})_C$ (MPa)			$(f_{ck})_E$ (MPa)	Pro./Exp.			
							Eq.(1)	Eq.(2)	Eq.(3)	Eq.(4)	Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(7)	Eq.(8)	Eq.(9)		Eq.(3)	Eq.(4)	Eq.(8)	Eq.(9)
T0-0	57.0	2281	44.8	4.30	10.69	41698	39.1	41.9	47.5	41.4	55.4	29.2	42.0	49.9	38.7	56.4	0.833	0.727	0.876	0.680
T0-10	52.5	2285	41.0	4.28	10.12	37438	34.3	39.1	43.5	38.0	54.2	28.8	38.4	47.2	35.9	43.0	0.830	0.724	0.900	0.684
T0-20	58.2	2276	45.2	4.44	10.92	43470	39.6	42.1	47.9	41.8	64.4	32.1	46.0	51.5	41.5	62.7	0.823	0.717	0.886	0.713
T15-0	51.1	2265	36.2	4.20	8.93	28881	28.2	35.7	38.5	33.7	49.5	27.1	32.5	43.3	31.3	23.3	0.753	0.659	0.847	0.612
T30-0	51.0	2262	35.8	4.21	8.98	29214	27.6	35.4	38.0	33.2	50.0	27.3	32.3	43.1	31.2	23.9	0.745	0.652	0.845	0.611
T30-10	49.7	2252	35.5	4.26	9.61	33299	27.2	35.2	37.7	33.0	53.0	28.4	33.5	43.4	31.9	32.3	0.758	0.664	0.873	0.641
T30-20	50.9	2248	40.1	4.21	10.10	36688	33.1	38.5	42.5	37.2	50.2	27.4	35.9	46.0	34.1	40.9	0.836	0.730	0.903	0.669
T50-0	48.9	2246	34.5	4.20	9.03	29331	26.0	34.5	36.6	32.1	49.5	27.1	31.1	42.2	30.2	24.1	0.749	0.656	0.862	0.617
T50-10	44.4	2235	32.5	4.06	9.04	29211	23.4	33.0	34.5	30.3	41.9	24.2	25.8	39.5	26.3	23.9	0.778	0.683	0.890	0.594
T50-20	44.1	2230	33.4	4.07	9.29	30789	24.6	33.7	35.5	31.1	42.4	24.4	26.8	40.1	27.1	26.9	0.805	0.706	0.911	0.615
T75-0	45.9	2229	34.1	4.02	7.90	22266	25.4	34.2	36.2	31.7	40.2	23.5	26.1	40.2	26.7	14.8	0.789	0.691	0.875	0.583
T100-0	40.3	2195	30.0	3.98	7.85	21637	20.2	31.3	31.8	28.0	38.0	22.6	21.7	37.0	23.3	14.3	0.790	0.696	0.919	0.577
F15-0	48.8	2258	37.5	4.15	8.62	26844	29.8	36.6	39.8	34.8	46.7	26.1	32.2	43.6	31.2	20.1	0.816	0.713	0.894	0.640
F30-0	50.3	2263	38.6	4.17	8.61	26818	31.2	37.4	41.0	35.8	47.8	26.5	33.6	44.5	32.3	20.0	0.814	0.711	0.885	0.642
F30-10	49.1	2261	37.4	4.16	8.66	27123	29.6	36.5	39.7	34.7	47.2	26.3	32.3	43.7	31.3	20.5	0.809	0.708	0.890	0.639
F30-20	49.2	2248	37.9	4.12	9.82	34688	30.3	36.9	40.2	35.2	45.1	25.5	31.7	43.6	31.0	35.6	0.818	0.715	0.886	0.629
F50-0	41.2	2230	32.7	4.02	8.18	23874	23.7	33.2	34.7	30.5	40.0	23.4	24.9	39.2	25.7	16.3	0.843	0.740	0.951	0.625
F50-10	46.7	2218	34.6	4.16	8.74	27114	26.1	34.5	36.7	32.2	47.2	26.3	30.1	41.8	29.5	20.5	0.787	0.690	0.896	0.632
F50-20	47.7	2204	35.4	4.20	8.94	28179	27.1	35.1	37.6	32.9	49.5	27.1	31.8	42.7	30.7	22.1	0.788	0.690	0.896	0.645
F75-0	37.2	2212	29.6	3.90	7.86	21868	19.7	31.0	31.4	27.7	34.4	20.9	19.2	36.0	21.6	14.5	0.843	0.743	0.966	0.579
F100-0	38.0	2187	29.5	3.87	7.85	21559	19.6	30.9	31.3	27.6	33.2	20.3	18.4	35.6	21.0	14.2	0.824	0.726	0.937	0.552

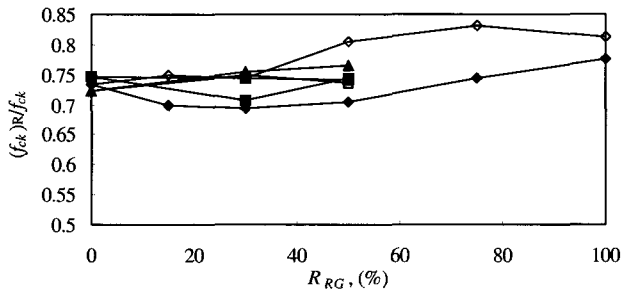
치환율이 증가할수록 반발도가 작아지는 영향을 반영할 수 있기 때문이다.

### 3.2 초음파 속도에 의한 압축강도

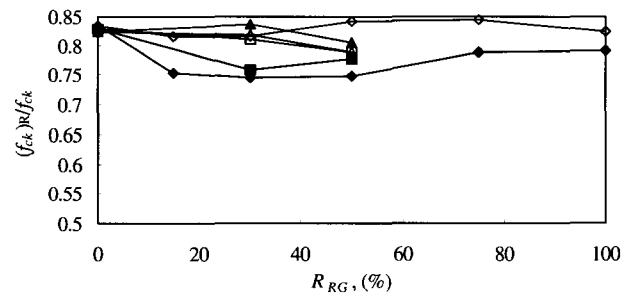
그림 3에는 재생조골재 치환율( $R_{GS}$ )과 실제 강도에 대한 초음파법에 의한 압축강도 비( $(f_{ck})_v/f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 초음파 속도에 의한 압축강도 평가모델 중 김무한 등의 제안식은 실험결과와 비교적 잘 일치하지만 재생 조골재 치환율이 증가할수록 과소평가하는 경향을 보이고 있다.



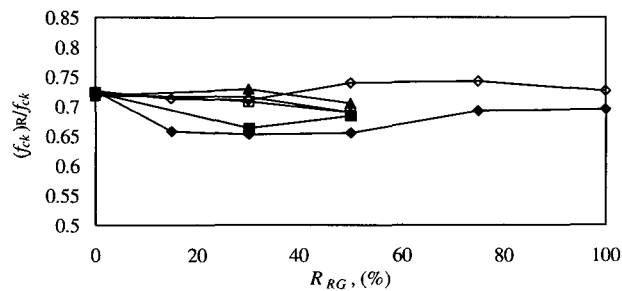
(a) 일본재료학회



(b) 일본건축학회



(c) 김무한 등



(d) 지남용 등

그림 1.  $R_{RG}$ 와  $(f_{ck})_R/f_{ck}$ 의 관계

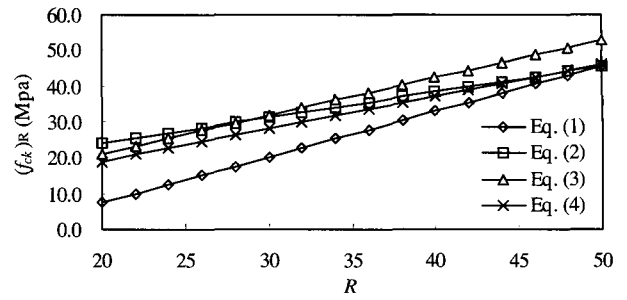
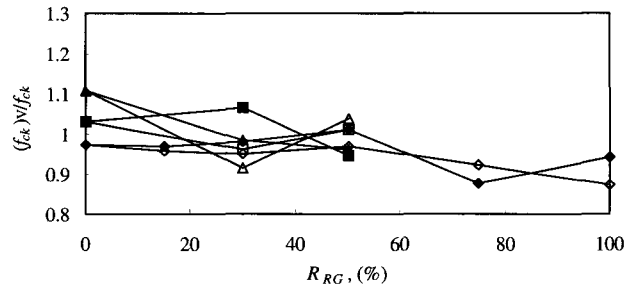
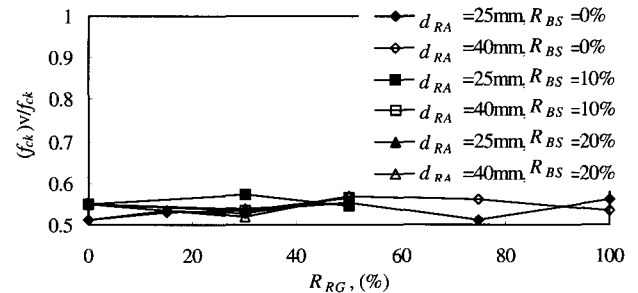


그림 2. 반발도와 각 제안모델들에 의한 압축강도의 관계



(a) 김무한 등



(b) 지남용 등

그림 3.  $R_{RG}$ 와  $(f_{ck})_v/f_{ck}$ 의 관계

이는 재생조골재의 입형이 거칠어 골재와 모르타의 부착면에서 불연속면을 증가시켜 초음파 속도를 저하시키기 때문이라 판단된다. 반면 지남용 등의 제안모델은 재생조골재 치환율에 관계없이 실제 압축강도를 매우 과소평가하는 경향을 보였다.

### 3.3 복합법에 의한 압축강도

그림 4에는 재생조골재 치환율( $R_{GS}$ )과 실제 강도에 대한 복합법에 의한 압축강도 비( $(f_{ck})_c/f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 복합법에 의한 압축강도 평가모델 중 일본건축학회 제안모델은 재생 조골재 치환율이 증가할수록, 그리고 재생 조골재 최대직경이 클수록 과소평가 정도가 증가하고 하였다. 지남용 등의 모델도 재생 조골재 치환율이 증가할수록 과소평가 정도가 증가하는 경향을 보였다.

반면 김무한 등의 모델은 재생 조골재 치환율에 관계없이 실험 값 대비 평균 0.9 수준에서 잘 일치하였다. 이는 식 (8)에서 나타내었듯이 반발도를 2차 함수로 그리고 물시멘트비의 영향을 반영함으로써 정확도를 높이고 있기 때문이다. 하지만 재생 조골재 최대직경의 변화에 따라 압축강도 비율의

편차가 증가하는 경향을 보였다. 재생골재 콘크리트의 반발도 및 초음파 속도는 재생 조골재의 내부균열 상태 및 부착된 미분말 등에 의해 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 보통 콘크리트의 실험결과에 근거하는 김무한 등의 제안식을 좀더 보편적으로 재생골재 콘크리트에 적용하기 위해서는 재생골재의 크기 및 치환율의 영향을 반영하는 것이 적절하다고 판단된다.

### 3.4 동탄성계수에 의한 압축강도

그림 5에는 재생조골재 치환율( $R_{GS}$ )과 실제 강도에 대한 동탄성계수법에 의한 압축강도 비( $(f_{ck})_C/f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 김무한 등은 동탄성계수법이 현행 구조물 진단분야에서 거의 사용되고 있지 않은 방법이지만 상당히 높은 평가도를 보이기 때문에 향후 진단분야에서 활용이 기대되는 비파괴 시험법임을 지적하였다. 본 연구에서도 천연골재를 사용한 보통 콘크리트에서는 실험결과와 잘 일치하였다. 하지만 재생조골재 치환율이 증가할수록 과소평가 정도가 급격히 증가할 뿐만 아니라 혼화재의 영향도 현저하였다.

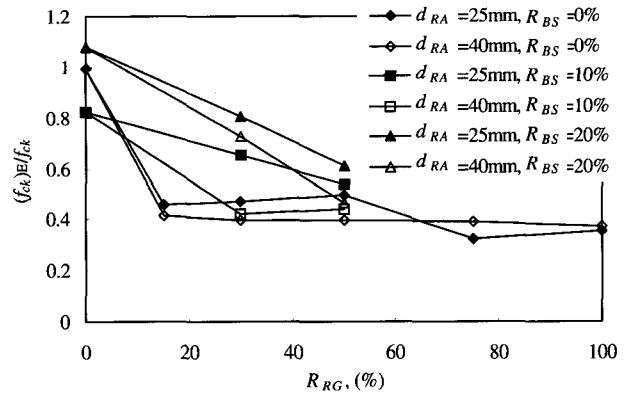


그림 5.  $R_{RG}$ 와  $(f_{ck})_E/f_{ck}$ 의 관계

이는 비중이 낮고 내부 균열이 많은 재생 조골재를 사용함으로써 재생 조골재 치환율 증가에 따른 동탄성계수 저하율이 강도저하율보다도 급격하였기 때문이다. 따라서 동탄성계수법을 이용하여 재생골재 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위해서는 재생 조골재 및 혼화재 등의 영향을 반드시 반영할 필요가 있다고 판단된다.

### 4. 비파괴 시험에 의한 압축강도 평가 제안모델

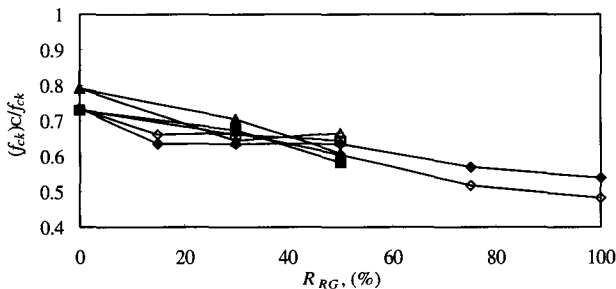
본 실험에서는 재생 조골재의 내부균열 및 표면에 부착된 모르타르 등의 영향으로 인해 재생골재 콘크리트의 반발도 및 초음파 속도는 동일강도의 보통콘크리트에서보다 낮게 나타났다. 따라서 천연골재를 사용한 보통강도 콘크리트의 실험결과에 근거하여 제시된 기존의 비파괴 강도평가 모델들은 재생골재 콘크리트에 적용하기에는 평가정도가 좋지 않았으며 재생골재 콘크리트에 적합한 새로운 모델개발의 필요성이 요구되었다.

비파괴시험에 의한 재생골재 콘크리트의 압축강도를 합리적으로 평가하기 위해서는 물시멘트비, 재생조골재 치환율과 같은 배합설계에 대한 정보가 필요할 것이다. 하지만 실제 건물에서 사용된 콘크리트 배합정보는 정확히 알 수 없는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 재생골재 콘크리트 배합표를 고려하지 않은 단순경우와 고려한 경우로 구분하여 비파괴 시험법에 의한 재생골재 콘크리트 전용의 압축강도 평가모델을 제시하였다. 이를 위해 이수용<sup>10)</sup>, 김무한<sup>5)</sup>, 구봉근<sup>2)</sup> 등의 기존 연구결과들을 함께 이용하였다.

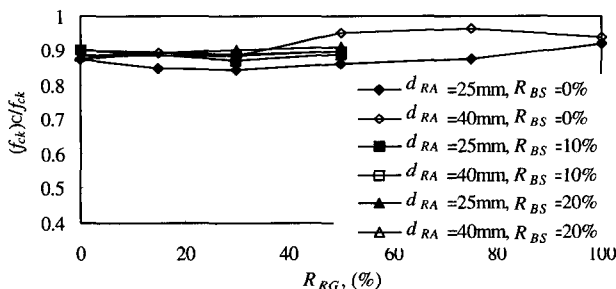
#### 4.1 반발도에 의한 압축강도 평가

그림 6에는 반발도( $R$ )와 실측된 압축강도( $f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 재생골재 콘크리트의 반발도는 동일강도의 보통 콘크리트에 비해 낮게 있었다. 또한 기존 제안모델인 식 (2) 및 식 (4)는 콘크리트 강도가 35MPa 이상에서는 실험결과를 매우 낮게 평가하고 있었다.

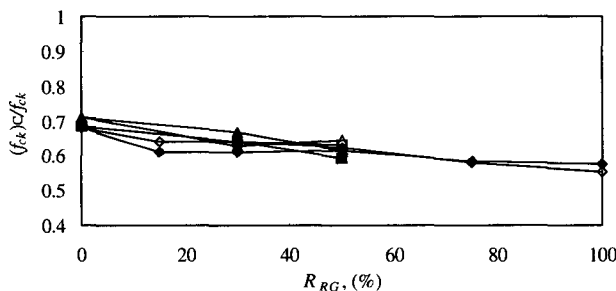
그림 6에 나타난 실험결과들의 회귀분석으로부터 재생골재 콘크리트의 반발도와 압축강도의 상관관계는 식 (12)로 나타낼 수 있었다.



(a) 일본건축학회



(b) 김무한 등



(c) 지남용 등

그림 4.  $R_{RG}$ 와  $(f_{ck})_C/f_{ck}$ 의 관계

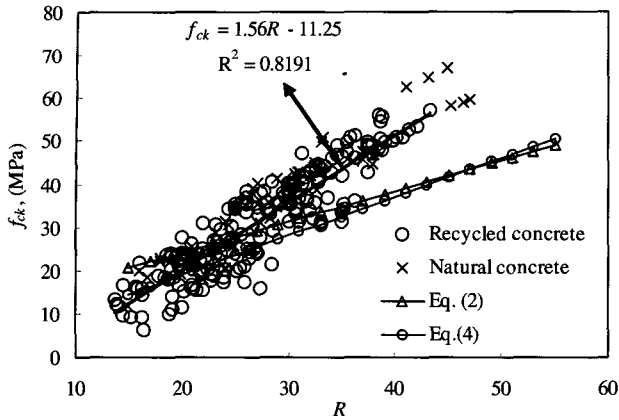


그림 6. R와  $f_{ck}$ 의 관계

$$(f_{ck})_R = 1.56R - 11.25 \quad (12)$$

실제 재생골재 콘크리트 압축강도에 대한 식 (12)에 의해 평가된 강도비는 평균 1.04, 표준편차 0.24로서 기존 제안식들에 비해 실험결과와 잘 일치하였다.

#### 4.2 초음파 속도에 의한 압축강도 평가

그림 7에는 초음파 속도(V)와 실측된 압축강도( $f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 일반적으로 동일 압축강도에서 초음파속도는 보통콘크리트보다 재생골재 콘크리트에서 늦었다. 특히 재생골재 콘크리트에서 초음파 속도와 압축강도의 상관관계는 매우 낮았다. 이는 재생골재에 부착된 모르타 및 골재 내부의 균열로 초음파의 단적 및 우회로 인하여 전파속도가 늦어지고 불규칙해졌기 때문이라 판단된다. 따라서 초음파 속도에 의해 재생골재 콘크리트의 압축강도를 평가하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

#### 4.3 복합법(반발도+초음파 속도)에 의한 압축강도 평가

반발도와 초음파 속도를 이용한 복합법에 의해 압축강도를 평가하기 위하여 비선형 다중회귀분석을 실시하였다. 비선형 다중회귀분석은 통계용 패키지인 SPSS를 이용하였다. 평가모델은 적절한 변수조합들의 반복과정을 통하여 가장 높은 상관계수를 모이는 모델로 결정하였다.

비선형 회귀분석에 의해 결정된 복합법의 압축강도 ( $(f_{ck})_C$ ) 평가모델은 식 (13)으로 나타낼 수 있었다.

$$(f_{ck})_C = 1.5R + 5.71V - 33.2 \quad (13)$$

식 (13)에 의해 평가된 압축강도와 실제 압축강도의 관계를 그림 8에 나타내었다. 실제 재생골재 콘크리트 압축강도에 대한 식 (13)의 복합법에 의해 평가된 강도비는 평균 1.03, 표준편차 0.23으로서 식 (12)에 의해 평가될 때와 차이가 없었다. 즉 재생골재 콘크리트의 압축강도를 평가할 때 초음파 속도는 무의미하며 반발도만으로도 적절히 평가될 수 있다고 판단된다.

#### 4.4 동탄성계수에 의한 압축강도 평가

그림 9에는 동탄성계수( $E_d$ )와 압축강도( $f_{ck}$ )의 관계를 나타내었다. 천연골재를 이용한 보통콘크리트에서는 동탄성계수와 압축강도간의 명확한 상관성을 보였다. 하지만 재생골재 콘크리트에서는 상관계수 0.15로서 동탄성계수를 통해 압축강도를 평가하는 것은 무의미하다고 판단된다. 이는 공명주파수도 초음파속도와 같이 조골재의 균열상태 및 표면 부착된 모르타에 의해 큰 영향을 받기 때문이라 판단된다.

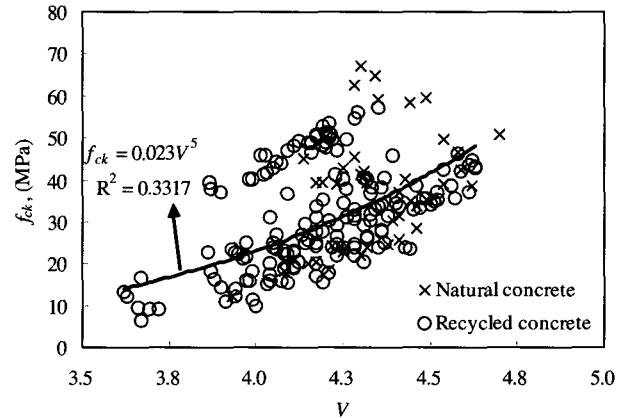


그림 7. V와  $f_{ck}$ 의 관계

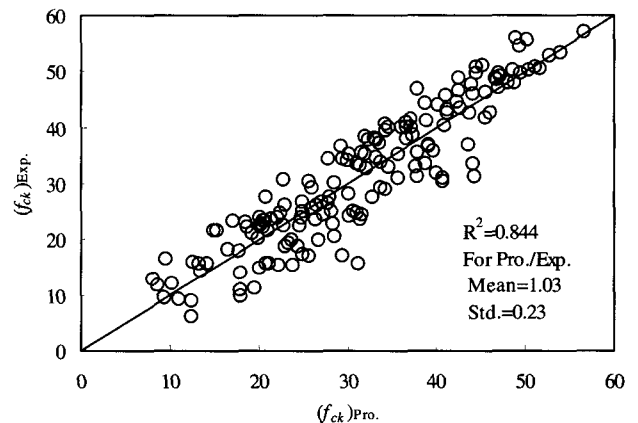


그림 8. 복합법(Eq.13)에 의한 압축강도와 실제강도의 비교

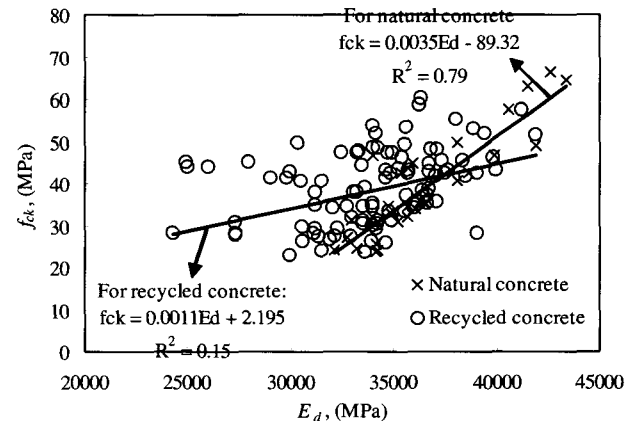


그림 9.  $E_d$ 와  $f_{ck}$ 의 관계

### 4.5 배합설계조건을 고려한 압축강도 평가

비파괴 시험인 반발도 및 초음파 속도는 콘크리트 압축강도뿐만 아니라 물결합재비, 혼화재 첨가율, 재령 및 골재의 입형과 종류 등에 의해 영향을 받음이 김무한, 정일영, 지남용, 이수용 등의 여러 연구자들에 의해 지적되고 있다. 따라서 비파괴 시험에 의해 재생골재 콘크리트의 압축강도를 합리적으로 평가하기 위해서는 각 인자들의 영향이 적절히 반영되어야 한다.

재생골재 콘크리트에서 비파괴 시험결과에 영향을 미치는 주요 인자들인 물결합재비( $W/B$ ), 재생조골재 치환율( $R_{RG}$ ), 재생조골재 최대직경( $d_{RA}$ ), 혼화재 첨가율( $R_A$ ), 세골재율( $S/A$ ), 재령( $D$ ) 등의 영향을 반영하기 위하여 다중 회귀분석을 실시하였다. 다중 회귀분석 방식은 초음파 속도와 재생골재 콘크리트 압축강도의 상관관계는 무의미하였기 때문에 반발도( $R$ )를 기본으로 한 식에서 변수추가방식을 사용하여 각 변수를 추가함으로써 식 (13)과 같이 회귀식을 작성하였다.

$$f_{ck} = k_1 R + k_2 (W/B) + k_3 (R_{RG}) + k_4 (d_{RA}) + k_5 (S/A) + k_6 (R_A) + k_7 (D) + k_8 \quad (13)$$

식 (13)에서의 계수  $k_1 \sim k_8$ 의 결정과정을 표 4에 나타내었다. 계수  $k_1 \sim k_8$ 의 결정에 이용된 데이터는 그림 6에 나타난 천연골재를 사용한 보통콘크리트도 포함되었다. 반발도만을 고려한 기본 식에서 각 인자들의 영향을 추가함에 따라 상관계수는 높아지고 있었다. 하지만 재생 조골재 최대직경, 세골재율 및 혼화재 첨가율이 상관관계에 미치는 영향은 없었다.

따라서 식 (13)에서 재생 조골재 최대직경, 세골재율 및 혼화재 첨가율을 제외하여 다시 회귀분석을 통해 계수를 결정하였다. 물결합재비, 재생조골재 치환비 및 재령이 고려된 재생골재 콘크리트의 압축강도는 비파괴시험으로부터 식 (14)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$f_{ck} = 1.04 R - 32.21 (W/B) - 4.87 (R_{RG}) + 0.095 (D) + 19.97 \quad (14)$$

여기서  $R$ 는 반발도를,  $W/B$ 는 물결합재비를,  $R_{RG}$ 는 재생조골재 치환비를,  $D$ 는 콘크리트 재령(일)을 각각 나타낸다.

그림 10에는 콘크리트 압축강도에 대해 식 (14)에 의한 제안 값과 실험 값의 비교를 나타내었다. 실험 값 대비 식 (14)에 의한 제안 값은 평균 1.02, 표준편차 0.17로서 반발도만을 고려한 식(12)에 비해 실험결과와 잘 일치하였다. 특히 재생조골재 치환율 및 콘크리트 강도 변화에 관계없이 실험결과와 잘 일치함으로써 비파괴 시험결과를 통해 재생골재 콘크리트의 압축강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 비파괴 시험결과에 대한 재생 조골재 치환율 및 최대직경, 고로슬래그 첨가율의 영향을 평가하고 기존 제안모델들의 적합성을 분석하였다. 또한 실험결과에 근거하여 비파괴 시험결과를 이용한 재생골재 콘크리트 압축강도 평가모델을 제시하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 재생골재 콘크리트의 압축강도는 반발도와는 비교적 높은 상관관계를 보였지만 초음파 속도 및 동탄성계수와는 매우 낮은 상관관계를 보였다.
- 2) 재생골재 콘크리트의 반발도는 동일 강도의 천연골재를 사용한 보통콘크리트에 비해 낮으며, 재생 조골재 최대직경 및 고로슬래그의 영향은 없었다.
- 3) 비파괴 시험결과에 의해 콘크리트 압축강도를 평가하는 기존 제안모델들은 재생골재 콘크리트 압축강도를 30~50% 과소평가하였다.
- 4) 배합설계를 고려하지 않은 재생골재 콘크리트의 압축강도는 반발도만을 적용하여 식 (12)와 같이 제시할 수 있었다. 식 (12)에 의해 평가된 재생골재 콘크리트 압축강도는 실험 결과 대비 평균 1.04, 표준편차 0.24를 보였다.

표 4. 다중회귀분석에 의해 결정된  $k_1 \sim k_8$

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$R^2$
1.577	-	-	-	-	-	-	-11.06	0.838
1.433	-23.55	-	-	-	-	-	4.63	0.857
1.330	-26.25	-4.35	-	-	-	-	11.13	0.876
1.321	-26.35	-4.39	0.06	-	-	-	9.94	0.876
1.417	-20.3	-3.77	0.03	28.78	-	-	-6.53	0.885
1.385	-20.55	-4.01	0.02	23.93	9.81	-	-3.71	0.886
1.010	-29.31	-4.77	-0.15	9.72	8.83	0.09	16.85	0.90

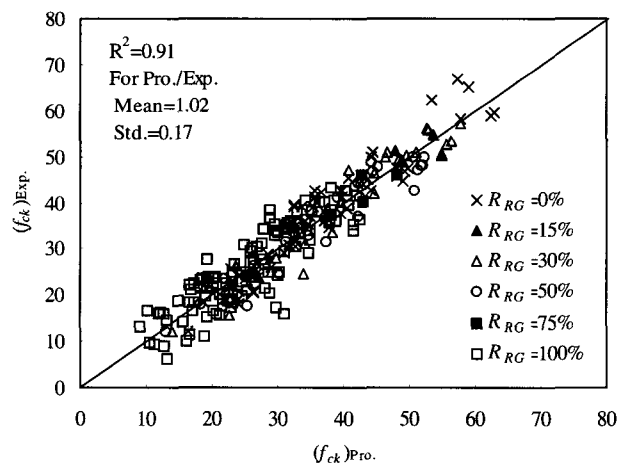


그림 10. 제안식 (14)에 의한 압축강도와 실제강도의 비교

- 5) 배합설계를 고려한 콘크리트의 압축강도는 반발도, 물결합재비, 재생 조골재 치환비 및 재령 등을 고려하여 식 (14)와 같이 제시할 수 있었다. 식 (14)에 의해 평가된 콘크리트 압축강도는 실험결과 대비 평균 1.02, 표준편차 0.17로서 실험결과와 잘 일치하였다.

### 참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2003
2. 구봉근, 이상근, 신재인, 이현석, "플라이애쉬와 실리카흄을 사용한 재생골재 콘크리트의 공학적 특성," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제11권 2호, 1999.11, pp. 221- 224
3. 권영진, 오상근, 김무한, "콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험식에 관한 연구", 구조물진단학회지, 제1권 1호, 1997. 6, pp.97-105
4. 김광우, 페콘크리트 및 아스팔트를 재활용한 농어촌 도로포장 공법의 개발, 농림수산 특정 연구사업 제 1차년도 연차보고서, 1995
5. 김무한, 한천구, 남상일 외 3인, "재생골재 콘크리트의 강도조기 추정 비파괴시험 적용성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 제9권 12호, 1993. 12, pp. 151-160
6. 김성도, 정진환, 구조공학실험, 도서출판 새길, 1999
7. 남상일, 류광우, 박정일, 김무한, "고강도영역 재생골재 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제14권 2호, 1994. 10, pp.637-640
8. 박선규, 조성현, 최세진, 김규용, 권영진, 김무한, "콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식의 적용성 검토", 대한건축학회 학술발표논문집, 제17권 2호, 1997. 10, pp.1239-1244
9. 배해량, 김규용, 윤현도, 안병익, "고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험식 검토", 건양대학교 논문집, 1997.
10. 석창훈, 이수용, "재생자갈 콘크리트의 비파괴 강도추정에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제19권 6호, 2003. 6, pp. 111-118
11. 임서형, 강현식, 지남용, "비파괴시험에 의한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제18권 8호, 2002. 8, pp. 51-58
12. 정일영, "콘크리트의 적절한 비파괴시험에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제9권 8호, 1993. 8, pp. 169-174
13. 홍성욱, 박신, 안용성, "건설폐기물로 배출되는 폐 콘크리트 재활용의 실태분석 및 효율화 방안"에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제 20권 2호, 2004. 2. pp. 97-104
14. Koh, Y., "A Practical Method and its Application for the Estimation of Concrete Strength," Cement Gijutsu Nempo, 1956, pp.244-249
15. Kashiwa, C., Non-Destructive Testing Method of Concrete, 기문당, 1979
16. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書·同解説(JASS 5), 1986, pp.276-297
17. 日本建築學會, コンクリート強度推定のための非破壊試験法マニュアル, 1983, pp.18-52