

# 건설안전분야

## 물-시멘트비에 따른 굳은 재생콘크리트의 특성

구봉근\* · 김태봉\*\* · 신재인\*\*\* · 박재성\*\*\*\* · 김정희\*\*\*\*

\* 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 대덕대학 산업안전과 교수, 공학박사

\*\*\* 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 충북대학교 대학원 토목공학과 석사과정

### I. 서 론

폐콘크리트양은 건설폐기물 발생량의 약 50%정도인 연간 약 500만톤<sup>1)</sup>이상으로 추정하고 있다. 따라서, 건설폐기물인 폐콘크리트에 대한 적절한 기술적 처리와 재활용 시스템이 구축된다면 도로포장 및 기타 포장 하층노반재료, 재생 입도조정쇄석, 건축물의 기초재, 토목 구조물의 기초재, 공작물의 되메우기 재료 등으로 활용될 수 있어 폐기되어버릴 단순한 쓰레기가 아니라 오히려 재활용 용도를 적극 개발하여야 할 중요한 자원이라고 볼 수 있다. 본 연구의 목적은 여러 가지 건설 폐기물 중에서도 재활용 가능성이 높으며 구조물 해체시 다량으로 얻어지는 폐콘크리트를 대상으로 건설공사에 재이용하기 위해 폐콘크리트 골재를 사용한 재생콘크리트의 공학적 특성을 실험을 통해 검토하고자 하는 것이다.

### II. 재료 및 실험방법

#### 2.1 실험계획

본 연구는 폐콘크리트 재생골재를 사용한 일반 구조용 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성을 향상시키기 위한 일련의 실험적 연구로서 실험계획은 Table 1 과 같다. 골재 구성조건과 물-시멘트비를 실험변수로 하였으며, 이에 따른 공학적 특성과 역학적 거동 특성을 분석하는데 초점을 두었다.

Table 1 Experimental programs

골재구성	W/C (%)	목표슬럼프 (cm)	측정항목	재령		
부순돌 강모래	40	15±1	압축강도 인장강도* 휨강도* 초음파속도 반발경도 단위용적중량* 응력변형률관계* 동·정탄성계수*	3일		
	45				1주(7일)	
	50					4주(28일)
재생굵은골재(A,B,C) 강모래	40			8주(56일)		
	45				*는 28일만 측정	
	50					
재생굵은골재(A,B,C) 재생잔골재 (A,B,C)	40					
	45					
	50					

## 2.2 사용재료

본 연구에 사용된 굵은 골재와 잔 골재의 종류와 생산방법은 Table 2와 같다.

Table 2 Classification of used aggregates according to crushing method

종류 \ 현황	소재지	업체명	파쇄 방법
부순돌	충북 청원	우석산업(주)	Jaw-crusher
강모래	충북 부강	양호골재	
재생골재 A	경북 경산	남경산업(주)	Impact-crusher(1차) Cone crusher(2차)
재생골재 B	경남 김해	금광개발(주)	Jaw-crusher(1차) Impact-crusher(2차)
재생골재 C	대전 유성	도시개발공사 재활용센터	Impact-crusher

본 연구에 사용된 굵은 골재는 최대치수가 19~20 mm이며, 체가름한 입도 분포는 표준 입도에 다 속하였다. 굵은 골재와 잔 골재의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of used coarse and fine aggregate

분류	기호	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	마모 감량 (%)	씻기손실량 (%)	F.M.
부순돌	G	2.60	3.08	1,552	28	0.8	6.76
재생굵은골재 A	A	2.32	9.10	1,251	39.5	0.5	6.71
재생굵은골재 B	B	2.31	8.74	1,339	40	0.7	8.32
재생굵은골재 C	C	2.28	8.43	1,327	43.5	0.6	7.35
강모래	s	2.50	0.93	1,686	-	0.7	2.57
재생잔골재 A	a	2.29	8.53	1,387	-	7.1	3.59
재생잔골재 B	b	2.22	9.58	1,343	-	5.8	3.56
재생잔골재 C	c	2.30	8.64	1,387	-	3.1	2.80

## 2.3 배합설계

골재의 조합은 연구결과를 비교분석하기 위하여 국내 건설 현장에서 주로 사용되고 있는 부순돌과 강모래의 조합을 기준으로 하였으며, 재생골재의 조합은 강모래와 재생 굵은골재(강모래·재생굵은골재 A, 강모래·재생굵은골재 B, 강모래·재생굵은골재 C)의 3가지 조합 그리고 각각의 재생잔골재와 재생굵은골재의 3가지 조합(재생굵은골재 A·재생잔골재 A, 재생굵은골재 B·재생잔골재 B, 재생굵은골재 C·재생잔골재 C)으로 나누어 실험하였다. 각각의 골재조합에 대하여 물-시멘트비는 40, 45, 50%의 3가지로 세분하였다. Table 4는 본 실험을 위한 배합설계표이다.

Table 4 Mix proportion of concrete

분류	W/C (%)	S/a (%)	목표슬럼프 (cm)	SP 첨가율 (%)	W (kg)	용적배합 (ℓ/m <sup>3</sup> )			중량배합 (kg/m <sup>3</sup> )		
						C	F.A.	C.A.	C	F.A.	C.A.
Gs	40	40	15 ± 1	0.3	197	156	251	376	493	627	978
As				0.3	211	168	241	361	528	602	837
Bs				0.28	203	161	246	370	508	616	854
Cs				0.3	205	163	245	367	513	612	838
Aa				0.3	215	171	238	357	538	544	827
Bb				0.34	235	187	223	335	588	496	774
Cc				0.3	220	175	234	351	550	539	801
Gs				45	40	15 ± 1	0.3	188	133	264	396
As	0.28	204	144				253	379	453	632	880
Bs	0.32	190	134				262	394	422	656	909
Cs	0.3	192	135				261	392	427	653	893
Aa	0.3	210	148				249	373	467	570	866
Bb	0.34	218	154				243	365	484	540	843
Cc	0.3	205	145				252	378	456	580	862
Gs	50	40	15 ± 1				0.3	185	117	271	407
As				0.28	198	126	263	394	396	656	914
Bs				0.25	185	118	271	407	370	678	939
Cs				0.32	187	119	270	405	374	674	922
Aa				0.3	205	130	258	387	410	591	898
Bb				0.3	210	133	255	382	420	566	882
Cc				0.3	190	121	268	402	380	616	916

주) W: 단위수량, C: 단위시멘트량, F.A.: 잔골재, C.A.: 굵은골재

### III. 실험결과 및 분석

굳은 콘크리트에 대하여 압축강도를 기준으로 하여 다른 실험값과의 상관관계를 통해 결정계수(coefficient of determination)를 포함한 실험식을 제안하였다. 특히, 비파괴 검사인 초음파속도와 반발경도는 이미 제시된 압축강도 추정식과 비교하면서 분석을 하였다. Table 5는 굳은 콘크리트에 대한 물리적 특성 실험의 결과를 나타낸 것이다.

#### 3.1 압축강도의 변화와 검토

처리도가 낮은 재생골재를 이용한 콘크리트에서는 강도가 재생골재의 모르타르 성분에 지배되기 때문에 일반 콘크리트 수준의 강도를 내기는 어렵다. 그러므로 재생골재콘크리트의 경우에는 일반적으로 고강도화를 기대하기란 품질적으로나 경제적으로 매우 어렵다. Fig. 1은 본 실험에서 천연골재와 재생골재를 사용한 굳은 콘크리트의 재령별 압축강도 변화양상(W/C=40%)을 도시한 것이다.

Table 5와 Fig. 1에서 알 수 있듯이 Gs의 재령 28일 압축강도는 329~364 kgf/cm<sup>2</sup>인데 비해 재생굵은골재와 강모래의 조합에서는 315~356 kgf/cm<sup>2</sup>이므로 Gs 압축강도의 약 95~98% 정도의 압축발현을 나타내어 굵은골재가 재생골재로, 잔골재가 강모래로 쓰여질 때는 압축강도면에서는 거의 같았다. 또한, 재생굵은골재와 재생잔골재의 조합에서는 압축강도가 265~340 kgf/cm<sup>2</sup>으로 Gs 압축강도

의 약 81~93% 정도의 압축강도를 나타내는 반면, 재생골은 골재와 강모래의 압축강도에 비해선 약 84~96% 정도로 나타났다.

Table 5 Test results of hardened concrete

분류	W/C (%)	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )				인장강도		초음파속도(km/sec)				반발경도				단위용적중량(t/m <sup>3</sup> )	동탄성계수	정탄성계수
		3d	7d	28d	56d	28d	28d	3d	7d	28d	56d	3d	7d	28d	56d	28d	28d	28d
		Gs	284	295	364	420	22.8	56.8	4.43	4.51	4.57	4.60	32	34	36	38	2.44	4.64
As	252	280	356	409	22.4	55.7	4.28	4.42	4.49	4.50	30	32	33	34	2.42	4.46	3.11	
Bs	244	266	336	382	18.9	52.0	4.19	4.26	4.39	4.40	28	30	32	33	2.37	4.16	2.95	
Cs	235	257	338	389	19.4	45.9	4.16	4.21	4.40	4.40	27	29	32	33	2.38	4.21	2.78	
Aa	228	262	340	383	17.0	47.9	4.01	4.25	4.48	4.48	26	29	33	33	2.39	4.41	2.99	
Bb	218	255	293	350	16.2	42.5	3.97	4.20	4.38	4.39	26	30	30	30	2.33	4.07	2.72	
Cc	215	254	299	347	17.0	44.6	3.90	4.19	4.40	4.40	22	26	30	31	2.34	4.14	2.62	
Gs	274	285	344	380	19.9	54.4	4.41	4.44	4.53	4.57	30	33	33	35	2.39	4.52	3.13	
As	232	267	319	360	18.0	49.9	4.14	4.34	4.48	4.50	27	31	32	33	2.38	4.31	2.86	
Bs	232	244	323	360	16.1	48.2	4.10	4.20	4.30	4.32	27	29	30	30	2.32	4.01	2.75	
Cs	218	232	321	362	16.8	44.5	4.09	4.16	4.32	4.32	26	27	31	31	2.34	4.05	2.59	
Aa	217	231	305	347	15.8	46.2	3.95	3.98	4.45	4.46	24	27	29	32	2.32	4.24	2.86	
Bb	199	220	271	330	15.4	39.8	3.79	3.80	4.25	4.30	21	24	29	30	2.27	3.78	2.62	
Cc	183	219	270	331	15.2	41.1	3.80	3.95	4.31	4.31	20	23	27	28	2.29	3.99	2.44	
Gs	265	274	329	344	17.8	44.6	4.39	4.41	4.52	4.52	25	30	32	33	2.35	4.45	2.96	
As	220	251	315	334	16.6	41.3	4.04	4.23	4.45	4.47	23	29	30	31	2.36	4.07	2.68	
Bs	220	234	317	333	14.7	41.0	4.05	4.13	4.29	4.30	25	27	29	29	2.28	3.82	2.42	
Cs	174	219	318	334	15.7	36.0	4.04	4.11	4.30	4.31	24	25	30	30	2.30	3.88	2.39	
Aa	177	210	273	311	15.0	36.0	3.73	3.90	4.43	4.44	20	23	30	31	2.27	4.07	2.68	
Bb	167	205	238	291	13.3	34.4	3.75	3.96	4.21	4.28	19	21	27	29	2.25	3.68	2.41	
Cc	159	201	265	298	14.6	35.8	3.61	3.85	4.28	4.29	19	21	28	29	2.26	3.74	2.25	

주) 인장강도와 휨강도의 단위는(kg/cm<sup>2</sup>)이고 동탄성계수와 정탄성계수의 단위는(x10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>)이다

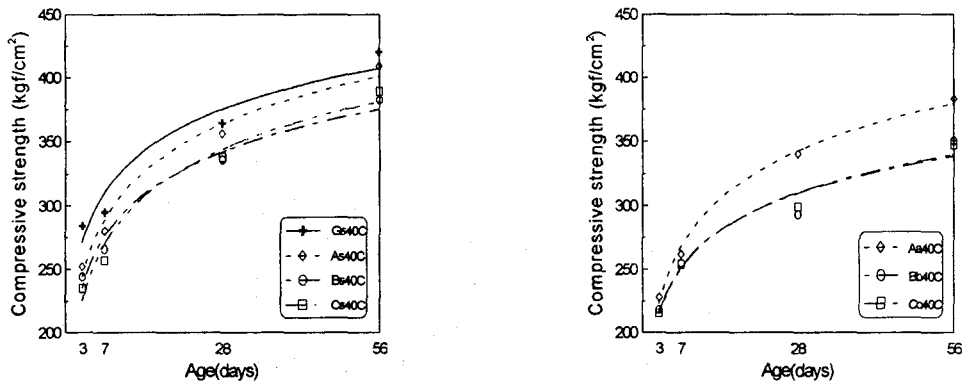


Fig. 1 Variation of compressive strength by curing age (W/C=40%)

### 3.2 초음파속도의 변화 검토

각 골재구성별 물-시멘트비에 따른 초음파 속도의 변화를 나타낸 것은

Table 5에서 볼 수 있고 다른 측정치와 유사하게 물-시멘트비가 감소함에 따라 대체적으로 증가하고 있으며, 초음파속도와 압축강도의 상관관계는 Fig. 2에 잘 나타나 있듯이 비례적인 관계를 보였다. 그리고, Table 6에 이들 상관관계를 1차식으로 회귀분석하여 제시하였다.

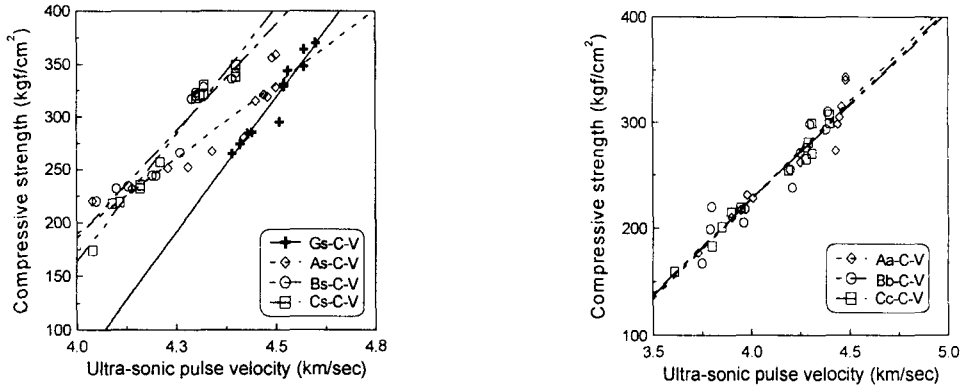


Fig. 2 Correlation between compressive strength and ultra-sonic pulse velocity-①

Table 6 Correlative equation between compressive strength and ultra-sonic pulse velocity

분 류	회귀방정식	결정계수 ( $R^2$ )
Gs-C-V	$y = 507.556 x - 1966.19$	0.9323
As-C-V	$y = 282.017 x - 938.396$	0.8615
Bs-C-V	$y = 403.094 x - 1426.96$	0.8954
Cs-C-V	$y = 478.342 x - 1749.78$	0.9724
Aa-C-V	$y = 186.482 x - 519.129$	0.9145
Bb-C-V	$y = 177.39 x - 482.649$	0.8818
Cc-C-V	$y = 180.412 x - 495.043$	0.9700

Table 6에서 볼 수 있듯이 초음파 속도로 압축강도를 추정할 수 있는 상관관계식의 결정계수 값이 대체로 약 0.9정도로 신뢰성이 큼을 알 수 있다. 따라서 일본건축학회 식  $F_c = 215Vp - 620$ 과 J.Pysziank의 추정식  $F_c = 92.5Vp^2 - 508Vp + 782$ 으로 본 연구에서 제안한 추정식과의 비교를 Table 6에 나타내었다.

Table 7에 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안한 추정식(Table 6)을 이용해서 실험치의 초음파속도로 압축강도를 추정한 결과, 다른 추정식에 비해서 신뢰도가 평균 97%이상 되었고 재생골재의 골재조합에서도 약 95% 이상의 신뢰도를 보였으므로 본 연구에서 제안한 식으로 압축강도를 충분히 추정하리라 사료된다.

Table 7 Comparison of compressive strength by variety estimated equation  
(ultra-sonic pulse velocity) (kgf/cm<sup>2</sup>)

분 류	실험치 압축강도	일본건축학회 추정식에 의한 압축강도	J.Pysziank의 추정식에 의한 압축강도	본 연구에서 제안한 추정식에 의한 압축강도
Gs45C	344	354	379	333
As45C	319	343	363	325
Bs45C	323	305	308	306
Cs45C	321	309	314	317
Aa45C	305	337	353	311
Bb45C	271	294	294	271
Cc45C	270	307	311	283
신뢰도	1	0.92	0.90	0.97

#### IV. 결 론

1. 재생굵은골재와 강모래의 조합의 28일 압축강도는 315~356 kgf/cm<sup>2</sup>로 Gs 압축강도의 95~98% 정도의 압축강도 발현을 나타내어 굵은골재로 재생골재를 썼을 경우는 압축강도면에서 별 차이가 없었다.

2. 초음파속도 측정시 압축강도의 추정은 본 연구에서 제안한 추정식(Table 6)이 기존 추정식 일본건축학회 추정식과 J.Pysziank의 추정식에 비해서 신뢰도가 매우 높았으며, 다른 측정치와 유사하게 W/C가 감소함에 따라서 점차 증가했다. 한편, 재생골재가 포함된 골재구성 콘크리트의 동탄성계수는 Gs동탄성계수의 약 90% 정도의 값을 나타내어서 동탄성계수의 값으로도 압축강도를 추정할 수 있었다.

3. 재생굵은골재나 강모래 조합의 인장, 휨강도는 Gs의 80% 이상의 발현치를 보였고 재생굵은골재와 재생잔골재의 조합에 비해선 약 1.2배의 발현치를 나타내었다. 또한, 압축강도와 상관계수에선 결정계수가 대부분 0.9이상으로 인장강도와 휨강도를 추정할 경우 매우 신뢰성이 큼을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 환경부, "전국 폐기물 발생 및 처리현황('96)", 1997
2. Buck, A. D., "Recycled Concrete as a Source of Aggregate", *ACI Journal*, Vol. 74, No. 5, 1977.
3. 건설교통부, "건설산업 폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술 개발에 관한 연구", 1997. 8, pp.1~723.
4. Nixon, P. J., "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete~ a Review", *Materials and Structures : Research and Testing*, Vol. 11. No. 65. 1980. pp. 371~378,