

## 循環굵은/잔骨材를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 特性<sup>†</sup>

† 崔起善 · 劉永燦 · 金巨煥 · 李道憲\*

韓國建設技術研究院, \*住宅都市研究院

## Properties of Fresh Concrete with Recycled Coarse and Fine Aggregates<sup>†</sup>

† Ki-Sun Choi, Young-Chan You, Keung-Hwan Kim and Do-Heun Lee\*

Korea Institute of Construction Technology, 1190, Simindae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

\*Housing & Urban Research Institute, 175, Gumi-dong, Bundang-gu, Seongnam, Gyeonggi-do, 436-704, Korea

### 요 약

본 연구는 순환잔골재를 사용한 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 특성을 파악하고 순환골재 콘크리트의 품질관리 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 순환굵은골재 및 순환잔골재의 치환율을 조합하여 설계압축강도 30MPa의 콘크리트를 제작하였으며, 공기량 및 슬럼프를 측정하였다. 측정된 공기량 및 슬럼프 경시변화를 통하여 순환잔골재의 재료적 특성이 콘크리트의 물성에 미치는 영향을 파악하였으며, 골재의 흡수율 차에 따른 품질성능 저하를 고려할 수 있도록 현장 도착 슬럼프를 기준으로 전체 배합수를 일정하게 유지하는 품질관리 방안을 제시하도록 하였다. 본 실험에서는 골재 종류(천연, 순환)에 따른 표면수 보정을 통해 1시간 후 현장도착 슬럼프가 일정하게 유지될 수 있도록 콘크리트를 배합하였다. 순환골재의 사용에 따른 압축강도의 저하는 나타나지 않았다. 또한 표면수 보정을 통한 전체 배합수의 관리를 통하여 순환골재 콘크리트의 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 순환굵은골재, 순환잔골재, 슬럼프, 품질관리

### Abstract

The objective of this study is to investigate the properties of fresh concrete with recycled coarse and fine aggregates. Four different kinds of aggregate with natural, recycled aggregates were prepared. The concrete mixtures were produced with test parameters of replacement ratio of recycled aggregate. The properties of the fresh concrete were measured by means of slump and air content according to elapsed time. Quality control method to maintain the constant total mixing water for recycled aggregate concrete was suggested. The all concrete mixtures were produced with approximately the same slump on the job site after an hour. Test results indicated that compressive strength of concrete with constant slump is not affected by the replacement ratio of recycled aggregate. Also the practical way for the quality control of recycled aggregate concrete is to maintain the constant total mixing water.

**Key words :** Recycled coarse aggregate, Recycled fine aggregate, Slump, Quality control

### 1. 서 론

순환골재는 기존의 등급별로 구분된 재생골재 규격에서 국토해양부장관이 정한 품질기준을 만족하는 골재로 차별화하여 정의하고 있다. 즉, 고품질의 순환골재를 기존의 재생골재와 구별하고 이를 적극적으로 활용하기

위한 근거를 마련하기 위하여 2003년 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률이 제정되었으며, 동 법률 제35조의 규정에 근거하여 2005년 순환골재 품질기준<sup>1)</sup>이 제정·공고되었다. 또한 2006년 KS F 2573콘크리트용 순환골재<sup>2)</sup> 및 KS F 4009레디믹스트 콘크리트<sup>3)</sup> 규격의 제정과 2007년 개정된 콘크리트구조설계기준<sup>4)</sup>에 콘크리트용 순환골재가 포함됨으로써 구조물 적용에 대한 제도적 근거를 모두 마련하게 되었다. 아울러 2007년

<sup>†</sup> 2009년 5월 4일 접수, 2009년 6월 10일 수리

\*E-mail: ck-suny@kict.re.kr

순환골재 품질인증제도의 시행으로 지속적인 품질관리가 가능해졌다. 이러한 정책적 지원과 산업계의 품질개선 노력 및 학계의 다양한 연구활동에 힘입어 순환골재에 대한 신뢰가 향상됨으로써 국내에서의 순환골재 생산 및 적용현황이 점차 확대되고 있다.

한편 순환골은골재는 최근 국내 제조사의 생산설비 및 제조기술의 향상으로 고품질의 콘크리트용 순환골은골재의 생산이 가능해졌으며, 품질의 안정화도 상당히 이루어진 상태이다. 반면, 순환잔골재는 아직까지 국내 제조방식 및 생산기술이 고품질의 순환잔골재를 생산하기 미흡한 실정이며, 최근에는 비로서 순환골재 품질기준을 만족하는 잔골재가 생산되고 있는 실정이다. 따라서 기존연구의 대부분이 저품질의 재생골재를 대상으로 하고 있으며, 연구자료도 충분히 축적되어 있지 못한 상황이다. 특히 실험실 내에서의 엄격한 품질관리 조건과 소량배합에 의해 제작된 순환골재 콘크리트로 평가된 연구결과는 현장에서의 골재관리, 배합조건, 타설, 양생 조건 등의 전반적인 현장조건을 반영하고 있지 못하다. 따라서 현행 순환골재 품질기준에서는 이러한 골재 및 콘크리트의 품질관리 수준을 고려하여 순환골재 치환율을 30%이하로 권장하고 있으며, 순환잔골재는 비구조용으로 용도를 제한하고 있다.

본 연구에서는 이러한 분석을 근거로 현장 제작조건과 동일한 대량 레미콘 제조와 운반 및 타설, 양생을 실시한 순환골재 콘크리트의 재료, 부착, 실물모형의 구조 성능 검증을 수행하는 연구를 진행 중이며, 이러한 실증적 연구를 통하여 현행 순환골재 품질기준 및 구조설계기준을 제고함으로써 순환골재에 대한 인식의 제고와 활용 촉진 및 적용확대를 위한 기술적 근거를 제시하고자 한다.

이를 위하여 선행연구<sup>5-10)</sup>에서 현재 국내에서 생산 가능한 콘크리트용 순환골재의 최대품질을 파악하고 현장 레미콘 배합에 의한 순환골은골재 및 순환잔골재 콘크리트의 재료 및 구조성능을 검토함으로써 구조용 콘크리트로서의 적용성을 검토하였다. 아울러 각각 순환골은골재 및 순환잔골재에 대한 현장시험배합을 통하여 현장에서의 순환골재 콘크리트의 품질을 유지할 수 있는 기본적인 관리방안을 제시하였다.

본 연구에서는 이러한 선행연구를 바탕으로 순환골은골재와 순환잔골재를 혼합 사용한 콘크리트에 대하여 선행연구에서 제시된 품질관리 방안의 유효성을 검증하고, 현장 제작조건과 동일한 대량 레미콘 제조와 운반 및 타설, 양생을 실시하여 순환골은/잔골재를 사용한 콘크리트의 재료특성을 규명하도록 하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

순환골재를 사용한 콘크리트는 순환골재의 높은 흡수율 및 모르타르, 미립분 등으로 인하여 시공성 및 역학적 성능이 저하되는 것으로 보고되고 있다. 특히 현장 배합의 경우 골재의 함수상태에 따라서 배합되는 콘크리트의 물리적, 역학적 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 순환골재 콘크리트에 대한 별도의 배합설계를 하지 않는 국내의 실정상 기존의 천연골재 콘크리트와 동일한 배합에 의해 생산할 경우 요구하는 품질확보가 어려울 수 있다.

본 연구에서는 물리적 특성이 다른 천연골은골재, 천연잔골재, 순환골은골재, 순환잔골재의 4가지 골재를 혼합 사용하여 현장배합을 실시할 경우 발생할 수 있는 콘크리트 성능저하를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 현행 품질기준을 만족하는 4가지 천연골재와 순환골재를 조합하여 레미콘을 생산하였으며, 콘크리트의 시공성에 영향을 미치는 굳지 않은 콘크리트 특성을 파악하기 위하여 시간에 따른 순환골재 콘크리트의 공기량 및 슬럼프 특성을 평가하였다. 또한 순환골재를 사용하여 현장배합을 실시할 경우 발생할 수 있는 콘크리트 품질저하를 효율적으로 제어하기 위하여 현장 도착 슬럼프를 기준으로 전체 배합수를 일정하게 유지하는 품질관리 방안을 제시하도록 하였다.

### 2.1. 순환골재 품질기준

2005년 제정·공고된 현행 순환골재 품질기준에서는 콘크리트용으로 사용할 수 있는 순환골은골재 및 순환잔골재의 품질을 Table 1과 같이 규정하고 있다. 또한 현행 품질기준에서는 콘크리트용 순환골재의 강도 및 적용범위를 제한하고 있다. Table 2에 나타난 바와 같이 순환골은골재는 27MPa이하의 구조용으로 사용할 수 있으나 순환잔골재는 21MPa 미만의 비구조용에서만 사용하도록 규정하고 있다.

### 2.2. 순환골재 선정

본 연구에서는 국내에서 생산되는 순환골재의 품질수준을 파악하고, 대표성을 갖는 골재를 선정하도록 하였다. 이에 따라 현행 순환골재 품질기준을 만족하며, 안정된 품질성능을 확보하고 있는 골재를 선정하고자 현재까지 국내에서 순환골재 품질인증을 받은 업체의 골재를 대상으로 순환골재 품질기준에서 제시하는 시험항목에 대한 시험을 수행하였다. Table 3은 순환골은골재

**Table 1.** Quality standards for recycled aggregates

Test item	Recycled coarse aggregates	Recycled fine aggregates
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.5 or more	above 2.2
Water absorption (%)	3.0 or below	below 5.0
Abrasion(%)	40 or below	-
Solid content(%)	53 or more	above 53
Amount of material finer (%)	1.0 or below	below 7.0
Potential reactivity	harmless	
Clay lumps(%)	0.2 or below	below 1.0
Soundness(%)	12	10
Impurity contents (%)	organic	1.0 or below(volume)
	inorganic	1.0 or below(weight)

**Table 2.** Application of recycled aggregates

Compressive strength (MPa)	Aggregate	
	Coarse aggregate	Fine aggregate
21 ≤ f <sub>ck</sub> ≤ 27	Natural or Recycled	Natural
f <sub>ck</sub> < 21		Natural or Recycled

**Table 3.** Recycled aggregate characteristics

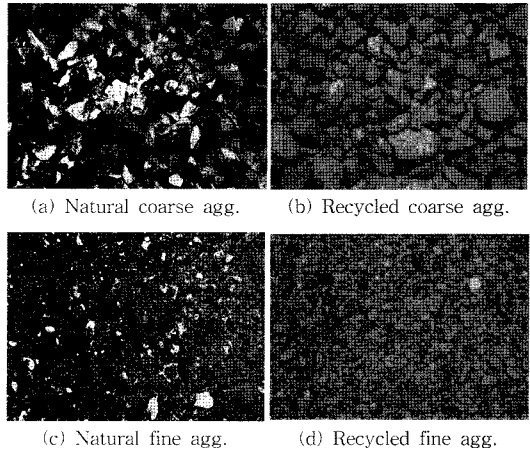
Aggregate	Maximum size (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
Recycled coarse	25	2.51	1.84	1,189
Recycled fine	5	2.35	4.43	1,298

및 순환잔골재의 품질기준항목 중 대표적인 시험결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 순환굵은골재의 품질은 흡수율 1.84%, 절건밀도 2.51 g/cm<sup>3</sup>을 상회하는 고품질의 골재이며, 순환잔골재는 흡수율 4.43%, 절건밀도 2.35 g/cm<sup>3</sup>로서 현재 국내에서 생산 가능한 대표적인 골재 품질을 갖는다. 실험에 사용된 천연골재 및 순환골재의 형상을 나타내면 Fig. 1과 같다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1. 실험변수 설정

본 연구는 순환골재 콘크리트의 재료 및 구조적 성능에 대한 종합적 연구를 통하여 현행 순환골재 품질기준



**Fig. 1.** Aggregates.

**Table 4.** Replacement ratio of recycled aggregates

	Replacement ratio of recycled coarse aggregate	Replacement ratio of recycled coarse aggregate					
		0	15	30	45	60	100
Replacement ratio of recycled fine aggregate	0	●					●
	15					●	
	30				●		
	45			●			
	60		●				
	100	●					●

및 구조설계기준을 제고함으로써, 콘크리트용 순환골재의 활용 촉진 및 적용확대를 목적으로 한다. 선행연구<sup>5-10)</sup>에서 순환굵은골재 및 순환잔골재를 개별 적용한 콘크리트의 성능검증 및 적용성을 검토하였다. 이러한 선행연구결과를 기초로 본 연구에서는 현행 품질기준에서 제시하는 강도기준 및 적용범위를 확대하고자 설계압축강도 30MPa의 콘크리트를 대상으로 순환골재를 총 골재 용적의 30%까지 혼합하여 사용하는 것을 전제로 Table 4에 나타난 바와 같이 실험변수를 설정하였다. Table 4에서 점선으로 표시된 구간이내가 현재 품질기준에서 제시하고 있는 설계압축강도 21MPa 미만의 비구조용으로 사용할 수 있는 순환골재 치환을 조합을 나타낸다. 또한 「 」으로 표시된 구간은 27MPa이하의 구조용으로 사용할 수 있는 순환골재의 범위를 나타낸 것이다.

#### 3.2. 순환골재 콘크리트 제작

실험에 사용된 콘크리트는 현장조건과 동일한 콘크리

트 특성을 얻기 위하여 콘크리트 강도 및 순환골재 치환율별로 최소 4 m<sup>3</sup> 이상의 레미콘 배합으로 제작하였다.

콘크리트의 설계압축강도는 구조용 콘크리트 중 국내에서 건축·토목용으로 일반적으로 사용되고 있는 30MPa으로 설정하였으며, 목표 슬럼프는 건축공사에서 가장 일반적으로 사용되는 150 mm로 선정하였다.

콘크리트의 배합조건은 Table 5와 같이 국내 레미콘사의 표준배합표를 기준으로 순환골은골재와 순환잔골재의 대체율을 각각 0, 15, 30, 45, 60, 100%에 대하여 Table 4에 나타난 바와 같이 8수준으로 조합하여 제작하였다.

3.3. 실험

본 연구에서는 흡수율이 높은 순환골재의 특성이 콘크리트 물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실제 현장배합에 앞서 시험배합을 실시하였다. 시험배합에서는 실제 레미콘 공장에서 타설 현장까지의 시간을 고려하

여 1시간 후의 슬럼프를 순환골재 치환율에 관계없이 150 mm로 유지할 수 있도록 표면수 보정을 하였다. 즉, 배합설계는 기존 설계압축강도 30MPa의 천연골재 콘크리트 배합비를 따르되 골재의 함수상태를 고려하여 1시간후의 슬럼프가 일정하도록 표면수율을 조정하였으며, 배합직후, 30분후, 1시간후의 슬럼프 경시변화를 관찰하였다. 순환골재 콘크리트는 배합과정에서 콘크리트 반죽질기를 육안관찰하면서 표면수량을 조정하였다. 이와 같은 시험배합에서의 경험을 바탕으로 본 배합에서는 순환골재의 치환율에 따라 1시간 후 현장도착 슬럼프가 일정하도록 배치에서 표면수 보정을 실시하였다.

제작된 레미콘은 제작공장에서 슬럼프, 공기량을 측정하고, 1시간 후 운반된 현장에서 타설직전 슬럼프와 공기량을 측정하여 경시변화를 비교하였다. 또한 이와 같이 현장도착 슬럼프를 일정하게 유지하는 개념의 품

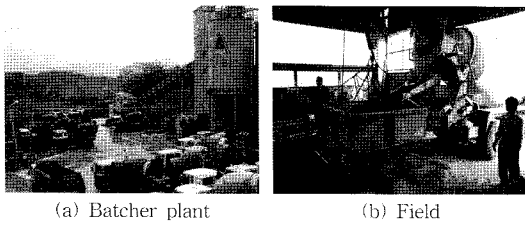


Fig. 2. Ready mixed concrete.

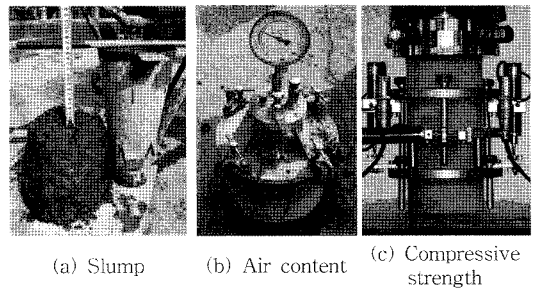


Fig. 3. Material test.

Table 5. Mixing table

f <sub>ck</sub> (MPa)	Replacement ratio (%)		W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
	Coarse	fine			W	C	G1	G2	S1	S2	AD
30	0	0	41.4	46.2	177	435	884	0	730	0	2.18
	15	60					790	133	307	438	
	30	45					650	265	422	328	
	45	30					511	398	538	219	
	60	15					372	530	653	109	
	100	0					0	929	730	0	
	0	100					884	0	0	768	
	100	100					0	929	0	768	

G1 : Natural coarse aggregate  
 G2 : Recycled coarse aggregate  
 S1 : Natural fine aggregate  
 S2 : Recycled fine aggregate  
 AD : Admixture

질관리 방안이 순환골재 콘크리트의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재령 28일의 압축강도 시험을 실시하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1. 공기량 및 슬럼프 경시변화

순환골재콘크리트와 순환잔골재의 치환율에 따른 1시간 후 현장도착 콘크리트의 공기량은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 천연골재 콘크리트는 4.0%이며, 순환골재 콘크리트는 4.2~5.5%로 비교적 천연골재 콘크리트에 비해서 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 현장배합 및 운반 등에 의해서 나타날 수 있는 오차를 포함하여 순환골재의 특성상 파쇄에 의해 제작되므로 입형이 불규칙하고 내부공극이 많은 모르타르 성분이 포함되기 때문에 콘크리트 중에 갇힌공기(entrapped air)가 증가하기 때문으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 순환골재의 높은 흡수율을 고려하여 배합당시 현장도착 슬럼프를 순환골재의 치환율에 관계없이 일정하게 유지함으로써 콘크리트의 성능저하를 제어할 수 있는 품질관리 방안을 제안하였다.

시험배합에서의 경험을 기초로 제작된 콘크리트의 1시간 후 현장 도착슬럼프는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 천연골재 콘크리트에 비하여 순환골재 콘크리트의 슬럼프는 대략 ±15% 범위로 나타났다. 또한 Fig. 5에서 순환골재의 치환율이 증가할수록 슬럼프는 증가하는 경향을 보이며, 특히 순환골재의 치환율이 잔골재에 비하여 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 레미콘 생산시 투입되는 골재의 함수상태에 영

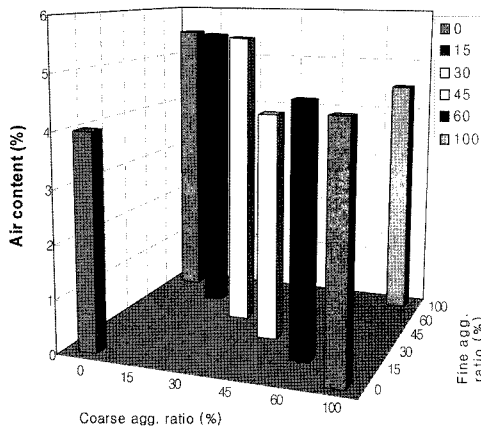


Fig. 4. Air conten of fresh concrete with recycled aggregate.

향을 받은 것으로 판단된다. 즉, 순환골재는 천연골재에 비하여 함수가 높은 상태였으며, 반면 순환잔골재는 천연잔골재에 비하여 건조된 상태에서 투입되었다. 이에 따라 순환골재의 치환율이 높을수록 콘크리트 내의 수분함량이 증가함으로써 현장 도착시점에서의 슬럼프가 천연골재에 비하여 증가한 것으로 판단된다.

##### 4.2. 압축강도

선행연구<sup>11)</sup>에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 순환잔골재 콘크리트의 치환율에 따라 현장 도착시점의 슬럼프를 동일하게 유지하였다. 이에 따라 제작된 콘크리트는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 치환율 60%까지는 압축강도의 저하없이 일정한 성능을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 4가지 서로 다른 특성의 천연, 순환골재를 조합하여 실험을 수행하였다. 각 실험체의 28일

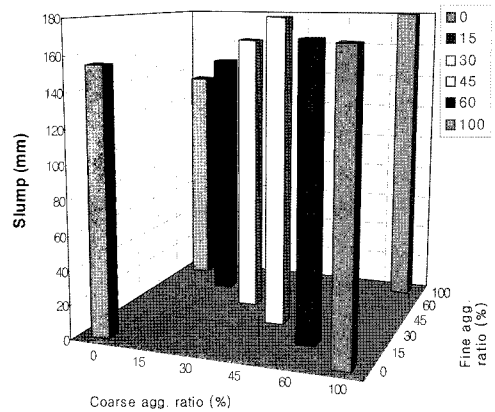


Fig. 5. Slump of fresh concrete with recycled aggregate.

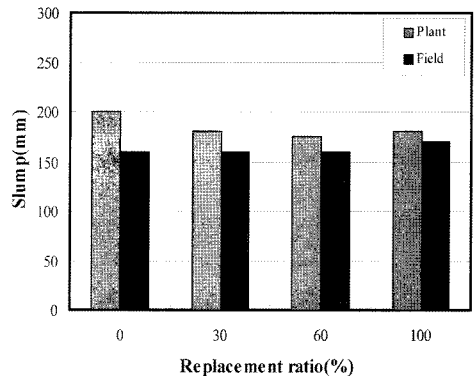


Fig. 6. Slump in fresh concrete with elapsed time(Choi, 2008)<sup>11)</sup>.

재령의 콘크리트 압축강도를 측정된 결과는 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 천연골재 콘크리트에 비하여 순환골재 콘크리트의 압축강도 저하는 나타나지 않았다. 한편

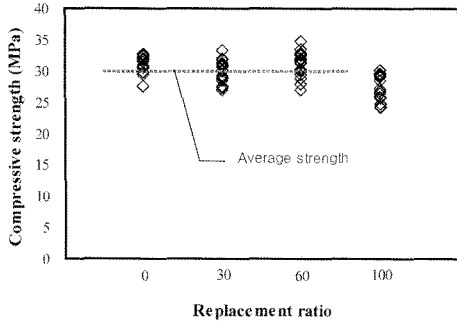


Fig. 7. Compressive strength of concrete with recycled aggregates.(Choi, 2008)<sup>11)</sup>.

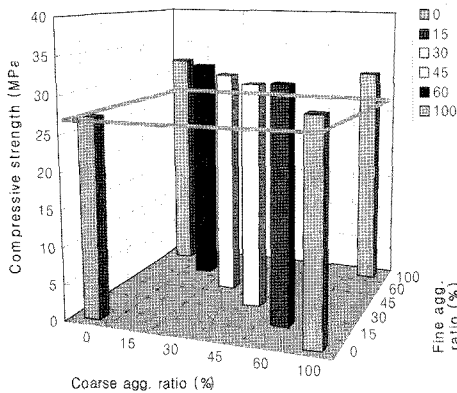


Fig. 8. Compressive strength of concrete with recycled aggregates.

순환골재 치환율에 따른 압축강도 차이를 Fig. 5와 비교하여 보면 슬럼프가 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보인다. 즉, 전체 배합수의 균형이 이루어지는 현장 도착시점에서의 슬럼프가 높은 콘크리트는 콘크리트 내의 배합수 증가로 물시멘트비의 증가효과가 나타나며, 이로 인해 콘크리트의 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 순환골은골재 및 순환잔골재를 혼합사용한 콘크리트의 기본 물성을 비교하고, 역학적 특성을 파악하였으며, 선행연구에서 제안된 현장 도착시점의 슬럼프를 일정하게 유지함으로써 전체 배합수 관리를 통한 품질관리 방안에 대해 검토하고자 하였다.

1) 순환골은골재 및 순환잔골재를 혼합사용한 콘크리트는 파쇄공정에 의해 제작되는 순환골재의 특성상 입형이 불규칙하고 내부공극이 많은 모르타르 성분이 포함되기 때문에 콘크리트 중에 갇힌공기(entrapped air)가 증가하여 공기량은 증가하는 것으로 나타났다.

2) 순환골재 콘크리트의 슬럼프는 투입골재의 함수상태에 따라서 영향을 받으며, 1시간 후 현장 도착시점의 슬럼프를 기준으로 슬럼프가 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타낸다.

3) 순환골은골재와 순환잔골재를 혼합사용한 콘크리트의 압축강도는 천연골재 콘크리트에 비하여 성능저하는 나타나지 않았다. 한편 흡수율이 높은 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 투입되는 골재의 함수상태 및 표면수 보정 등에 의한 현장 도착시점의 슬럼프의

Table 6. Physical properties of recycled concrete

$f_{ck}$ (MPa)	Replacement ratio (%)		Air content (%)		Slump (mm)		Compressive strength (MPa)
	coarse	fine	Plant	Field	Plant	Field	
30	0	0	4.5	4.0	195	155	27.34
	15	60	5.8	5.5	190	150	33.25
	30	45	5.5	5.2	190	165	31.09
	45	30	5.7	4.2	200	180	31.24
	60	15	6.0	4.6	185	170	31.83
	100	0	5.3	4.5	180	170	29.53
	0	100	5.0	5.5	185	135	32.39
	100	100	5.8	4.5	195	180	31.00

영향을 받는 것으로 나타났다. 이로부터 선행연구에서 제안된 현장도착 시점을 기준으로 슬럼프를 일정하게 유지할 경우 골재의 함수상태에 따른 물리적, 역학적 성능 변화를 제어할 수 있으며, 이러한 전체 배합수 관리를 통하여 콘크리트의 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

**감사의 글**

본 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업으로 수행중인 건설폐기물 재활용 기술 개발 연구(05건설핵심D07)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. 건설교통부, 2005 : 순환골재 품질기준
2. KS F 2573, 2006 : 콘크리트용 순환골재, 한국표준협회.
3. KS F 4009, 2006 : 레디믹스트 콘크리트, 한국표준협회.
4. 한국콘크리트학회, 2007 : 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, pp. 36.
5. 지상규 등, 2007 : 순환골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성, 대한건축학회학술발표대회논문집, 제27권 1

- 호, pp. 607-610.
6. 이민정 등, 2008 : 철근의 위치에 따른 이형철근과 순환골은골재 콘크리트의 부착성능, 대한건축학회논문집구조계, **24(8)**, pp. 29-39.
7. 이원석 등, 2007 : 순환골은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도와 설계기준 평가, 대한건축학회학술발표논문집, **27(1)**, pp. 159-162.
8. 김윤수 등, 2007 : 순환골은골재를 치환한 철근콘크리트 기둥의 압축거동 특성, 대한건축학회학술발표논문집, **27(1)**, pp. 203-206.
9. 김윤수 등, 2008 : 중심축력을 받는 순환골은골재 콘크리트 기둥의 압축거동 특성, 대한건축학회논문집구조계, **24(4)**, pp. 75-82.
10. 송선화 등, 2008 : 순환잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 특성, 한국콘크리트학회보학술발표논문집, **20(1)**, pp. 317-320.
11. 최기선 등, 2008 : 순환잔골재를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회가을학술발표논문집, **20(2)**, pp. 373-376.
12. 정지용 등, 2006 : 재생골재 임형이 재생골재 콘크리트의 압축강도와 슬럼프에 미치는 영향, 한국콘크리트학회학술발표논문집, **18(1)**, pp. 97-100.

**崔 起 善**

- 1998년 한남대학교 건축공학 학사
- 2000년 한남대학교 건축구조 공학석사
- 2001~현재 한국건설기술연구원 건축구조 · 자원 연구실 연구원

**劉 永 燦**

- 1986년 한양대학교 건축공학 학사
- 1988년 한양대학교 건축구조 공학석사
- 1996년 한양대학교 건축구조 공학박사
- 1989~현재 한국건설기술연구원 건축구조 · 자원 연구실 책임연구원

**金 巨 煥**

- 1977년 서울대학교 건축공학 학사
- 1984년 미국 플로리다 주립대 토목구조 공학석사
- 1987년 미국 텍사스대 토목구조 공학박사
- 1988~현재 한국건설기술연구원 건축구조 · 자원 연구실 책임연구원

**李 道 憲**

- 1981년 동국대학교 토목공학 학사
- 1988년 일본 동북대학 콘크리트재료 공학석사
- 1991년 일본 동북대학 콘크리트재료 공학박사
- 1992~현재 대한주택공사 주택도시연구원 선임연구원