



## 순환골재와 플라이애쉬가 콘크리트 유동성 및 강도에 미치는 영향

김규현<sup>1)</sup> · 신명수<sup>1)</sup> · 공영식<sup>2)</sup> · 차수원<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>울산과학기술대학교 도시환경공학부 <sup>2)</sup>울산대학교 건설환경공학부

### Effect of Fly Ash on Rheology and Strength of Recycled Aggregate Concrete

Kyu-Hun Kim,<sup>1)</sup> Myoung-Su Shin,<sup>1)</sup> Young-Sik Kong,<sup>2)</sup> and Soo-Won Cha<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 689-798, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

**ABSTRACT** As the amount of construction wastes increase, reuse of demolished concrete is being considered in research areas. Reflecting these interests, this experiment was performed to clarify concrete's mechanical property and workability using recycled aggregate as a coarse aggregate. Eleven cases of concrete specimens were produced by changing the rates of replacement of coarse recycled aggregate, replacement of fly ash, design strength, and moisture state of coarse aggregate. Compressive and tensile split strength tests were taken to study the mechanical properties of hardened concrete. To verify flowability of fresh concrete, a slump test and a flow curve test using ICAR Rheometer were performed. It was found that using recycled aggregate and fly ash leads good workability by testing slump and flow curve. The yield stress of fresh concrete decreased with increase of recycled aggregate substitution rate. Through the test, it was confirmed that there is inversely proportional relationship between the slump and yield stress roughly. Recycled aggregate concrete containing fly ash has considerably lower plasticity viscosity than not containing fly ash. Strength test results showed that recycled aggregate tended to decrease compressive and tensile strength of concrete, when recycled aggregate was used as a coarse aggregate. Using over 30% recycled aggregate caused significant decreases in compressive and tensile strength. Replacing 30% cement with fly ash was helpful to improve the long-term strength of concrete.

**Keywords** : recycled aggregate, fly ash, rheology, compressive strength, split tensile strength

### 1. 서 론

최근 건물의 노령화 및 기능 저하 등의 이유로 도시재개발 또는 도시환경정비 등의 사업이 진행되면서 건설 부산물의 발생량이 증가하고 있는 추세이다. 건설 폐기물은 전체 폐기물에서 차지하는 비율이 49% 정도로 상당히 높을 뿐 아니라 그 비율이 증가하고 있는 실정이다.<sup>1)</sup> 이러한 대량의 건설 폐기물은 최종 매립장의 증설 부담을 가중시킬 뿐 아니라 일부는 불법적 매립이나 투기와 같이 부적합하게 처리되면서 환경오염 문제를 야기하고 있다.

한편 도시의 고도화와 함께 사회기반시설이 끊임없이 확충되고 건설규모가 대형화됨에 따라 건설재료로 사용되는 골재의 소비량이 매년 크게 증가하고 있다. 자원의 고갈과 환경보전의 제약으로 인해 천연골재의 공급량은

점차 감소할 것으로 보여 골재의 수요와 공급에 불균형 현상이 심화될 것으로 예상된다.<sup>2)</sup>

이러한 상황에서 건설폐기물의 50% 이상을 차지하는 폐콘크리트의 재활용은 증가하는 골재의 사용량을 충족하고 폐기물 매립 문제를 해결할 수 있는 대안으로 부상하고 있다. 폐콘크리트는 일련의 공정을 통해 기존 골재에 붙어있는 대부분의 시멘트 페이스트, 모르타르, 불순물 등을 제거함으로써 순환골재로 재사용 될 수 있다. 하지만, 순환골재는 천연골재에 비해 낮은 밀도와 높은 흡수율 등의 단점으로 인해 매우 제한적으로 사용되고 있다. 순환골재는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 주로 성토 및 복토와 도로의 보조기층용으로 사용되고 있으며, 콘크리트 구조물용으로는 거의 사용되고 있지 않고 있는 실정이다.

폐콘크리트를 처리하여 다양한 용도에 사용할 수 있는 순환골재를 생산하기 위해서는 우선 순환골재의 역학적 및 내구적 성능에 대한 구명이 선행되어야 하고, 이를 기반으로 순환골재를 활용한 콘크리트의 품질향상을 위한 기술개발이 요구된다.

\*Corresponding author E-mail : chasw@ulsan.ac.kr  
 Received January 2, 2013, Revised January 17, 2013,  
 Accepted January 17, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

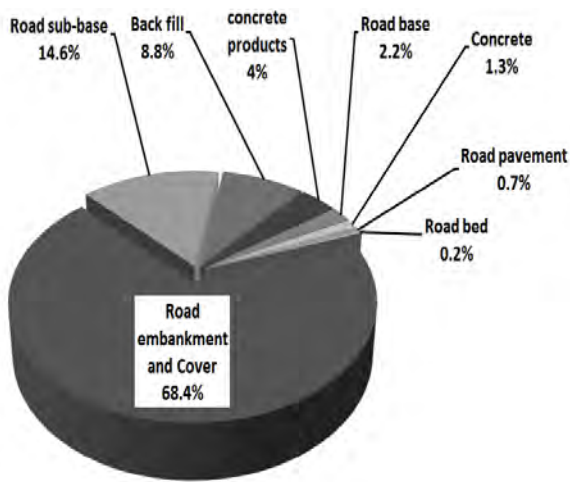


Fig. 1 Usage of recycled aggregate concrete<sup>3)</sup>

콘크리트 표준시방서에서는 순환골재가 표준 품질 및 입도의 기준(Table 1, 4)을 만족할 경우, 순환골재 최대 치환량이 굵은골재 총량 대비 30% 이내이고 설계기준 압축강도가 21 MPa 이상 27 MPa 이하이면 기둥, 보, 슬래브와 같은 구조용으로 사용할 수 있도록 허용하고 있다.<sup>4)</sup>

Kou와 Poon은 전체 잔골재의 양에서 순환 잔골재의 치환 비율이 증가할수록 콘크리트의 유동성이 증가한다고 밝혔다.<sup>5)</sup> Kou와 Poon은 또한 순환골재를 사용하면 높은 함수율의 영향으로 배합 시 자유수가 증가하게 되어 유동성을 높인다고 기술하였다.<sup>6)</sup> 그리고 Nassar과 Soroushian 역시 순환골재의 사용이 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 값을 증가시켰다고 언급하였다.<sup>7)</sup> 윤승조 등은 순환굵은골재와 순환잔골재의 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구에서 순환골재의 치환율이 높아질수록 슬럼프치가 증가하는 경향을 가진다고 밝혔다.<sup>8)</sup> 한천구와 박용규는 일정한 물-결합재비 하에서 플라이애쉬의 시멘트 치환율을 40%까지 높여가며 슬럼프 실험을 진행한 결과, 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 콘크리트의 유동성이 증가한다고 밝혔다.<sup>9)</sup>

슬럼프 실험에서 슬럼프 콘이 들어 올려질 때, 굳지 않은 콘크리트는 중력에 의해 아래로 흘러내린다. 이 때 중력에 의해 콘크리트 내에 발생된 전단응력이 콘크리트의 항복응력보다 작아질 때 멈추게 된다. 이러한 이론을 바탕으로 슬럼프 값과 항복응력(yield stress) 사이에 밀접한 상관관계가 존재할 것이라 추측되어 왔다. Wallevik에 따르면, 콘크리트의 항복응력과 슬럼프의 상관관계를 밝히

기 위해서 다양한 실험들이 진행되어 왔으며 몇몇 관계식들이 제안되었다. 하지만, 소성점도(plastic viscosity)와 슬럼프 값 사이에는 특별한 관계는 존재하지 않는다고 기술하였다.<sup>10)</sup> 그러나, 현재까지 순환골재 콘크리트에 대해서는 항복응력과 소성점도에 대한 연구가 미비한 실정이다.

Oliveira와 Vazquez는 순환골재의 함수상태에 따른 압축강도의 변화를 조사하기 위해 함수상태가 0%, 약 80%, 100%인 순환골재를 이용하여 실험하였다. 결과는 함수상태가 약 80%인 순환골재(semi saturated state)로 만든 콘크리트의 압축강도가 가장 좋은 것을 발견하였다.<sup>11)</sup> 또한, Poon et al.의 실험에서는 공기 중 건조된 순환골재(air dried state)를 사용하되 치환율이 50%를 초과하지 않는 콘크리트가 가장 좋은 강도성능을 나타냈다고 보고하였다.<sup>12)</sup> Berndt는 절대건조상태의 순환골재를 이용한 배합을 시도하였을 때 골재에 의한 배합수의 흡수로 인해서 배합 후 급격하게 워커빌리티가 나빠지며 다짐을 진행하기 어려웠다고 기록하였다.<sup>13)</sup>

또한 전체 골재량 대비 순환골재의 치환율 증가와 강도 저하의 관계를 조사하기 위해서 많은 연구가 선행되어 왔다. 그 중 Xiao et al.에 따르면 동일한 물-결합재비(W/B)에서 순환골재의 치환율을 0, 30, 50, 70, 100%로 증가시켰을 때, 치환율이 증가할수록 압축강도가 저하된다는 사실을 증명하였다. 또한, 치환율 0% 콘크리트와 비교할 때 치환율 30% 콘크리트의 압축강도 감소율은 비교적 낮는데 비해 50% 이상 치환된 시험체의 경우 급격한 압축강도 저하가 있는 것을 확인하였다.<sup>14)</sup> Kwan et al. 역시 동일한 물-결합재비(W/B)에서 순환굵은골재의 비율을 0, 15, 30, 60, 80%로 증가시키며 콘크리트의 압축강도를 비교하였다. 그 결과 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 보였으며, 15%와 30%에서 감소한 것에 비해 60% 이상 치환하였을 때 훨씬 큰 감소율을 보였다.<sup>15)</sup>

심중성 등은 굵은골재를 100% 순환골재로 사용하며 순환잔골재와 플라이애쉬의 혼입정도에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 대하여 연구하였다. 그 결과 플라이애쉬의 시멘트 치환율이 증가할수록 압축강도가 저하되었고 플라이애쉬를 사용하지 않은 콘크리트는 28일 이후 강도 증가율이 감소하였으나 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 지속적인 강도 증가율을 보였다고 밝혔다.<sup>16)</sup> Berndt는 순환골재를 이용하면서 시멘트를 부분적으로 플라이애쉬와

Table 1 Particle size distribution standard of recycled aggregate suggested by KCI

Sieve size (mm)			Percentage passing (%)										
			4	25	20	13	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
Recycled coarse aggregate	Max. size (mm)	25	100	95~100	-	25~100	-	0~10	0~5	-	-	-	-
		20	-	100	90~100	-	20~55	0~10	0~5	-	-	-	-
Recycled fine aggregate			-	-	-	-	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

고로슬래그로 대체할 경우 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 비교의 목적으로 천연골재만을 사용하면서 시멘트량의 50%를 고로슬래그로 대체하였을 때 플라이애쉬나 다른 비율의 고로슬래그로 시멘트를 대체하여 배합한 콘크리트에 비해 강도와 투수계수 등 내구성에서 가장 좋은 성능을 보였다고 밝혔다. 한편 시멘트량의 50%를 플라이애쉬로 치환하였을 경우 압축강도와 탄성계수가 감소하는 등 좋지 못한 결과를 도출했다. 또한 순환골재만을 이용하여 콘크리트를 제작했을 때 역시 시멘트를 50% 고로슬래그로 치환하는 것이 콘크리트의 강도와 내구성 증가에 도움을 주었다고 밝혔다. 순환골재와 함께 플라이애쉬의 사용은 장기 강도 증가율을 향상시키긴 했지만 시멘트만을 사용한 콘크리트나 고로슬래그로 치환한 콘크리트보다 현저히 낮은 강도를 발현하는 것을 확인하였다.

양근혁 등에 따르면 순환골재의 품질은 순환골재를 이용한 콘크리트의 강도에 크게 영향을 미친다. 품질이 낮은 순환골재일수록 골재 표면에 접착된 시멘트 페이스트 양이 증가한다. 이는 골재의 계면 접착강도를 저하시키고 순환골재를 사용한 콘크리트의 강도저하를 초래한다고 설명하였다.<sup>17)</sup>

콘크리트를 구성하는 골재와 시멘트 사이에 존재하는 interfacial transition zone(ITZ)은 콘크리트 강도에 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다. 순환골재를 활용한 콘크리트에는 기존 골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트와 기존 골재 사이에 ITZ가 존재하는 동시에 새로운 시멘트 페이스트와 ITZ를 형성하면서 천연골재만을 사용하는 콘크리트보다 많은 ITZ를 포함하고 있는 것도 순환골재 콘크리트의 강도 및 내구성을 약화시키는 원인으로 지적되고 있다.<sup>18)</sup>

앞서 기술한 현황을 바탕으로 이 실험연구의 목적은 순환골재를 활용한 콘크리트의 유동성과 강도 특성에 대한 기반 자료를 파악함으로써 향후 순환골재 콘크리트의 품질 향상을 위한 기술 및 폭넓은 활용분야 발굴에 이바지하는 것이다. 이를 위해서 콘크리트의 설계기준강도, 순환골재의 함수상태, 순환골재의 굵은골재 치환율, 플라이애쉬 혼용에 따른 콘크리트의 압축 및 쪼갬인장강도 특성을 조사하였으며, 순환굵은골재의 치환율과 플라이애쉬 혼용에 따른 유동성을 조사하였다.

## 2. 실험계획 및 배합

### 2.1 실험계획 및 변수

이 실험에서는 순환골재를 활용한 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 쪼갬인장강도 등에 대한 특성을 조사하였다. 실험변수로는 콘크리트의 설계강도, 순환골재의 함수상태, 총 굵은골재량에 대한 순환굵은골재의 치환율, 플라이애쉬 사용 유무 등을 사용하였다. 이에 따라 Table 2에

Table 2 Experimental variables

Mixture case	Design compressive strength (MPa)	Moisture state of coarse aggregate	Replacement ratio of recycled aggregate (%)	Use of fly ash
N-SSD-0	24	SSD	0	X
NF-SSD-0			0	O
N-SSD-30			30	X
NF-SSD-30			30	O
N-SSD-100		OD	100	X
NF-SSD-100			100	O
N-OD-100			100	X
H-SSD-0			40	SSD
H-SSD-30	30	X		
H-SSD-100	100	X		
HF-SSD-100	100	O		

Table 3 Properties of fly ash

SiO <sub>2</sub> (%)	Water (%)	LOI (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Flow value ratio (%)	Activity index (%)
48.8	0.1	3.5	2.14	3360	101	81



Fig. 2 Natural and recycled coarse aggregate

정리된 것과 같이 11가지 경우에 대한 시험체 제작과 실험을 계획하였다.

시험체명은 설계강도가 24 MPa일 경우 N, 40 MPa일 경우 H라 한다. 순환골재의 함수상태는 표면건조포화상태를 SSD(saturated and surface-dried)로, 절대건조상태를 OD(oven-dried)로 나타내며, 굵은골재에 대한 순환골재 치환율(%)에 따라 0, 30, 100이라 하였고, 결합재량의 30%를 플라이애쉬로 치환한 경우 F로 표시하였다.

### 2.2 사용재료

이 실험에서는 콘크리트 시험체 제작을 위해 밀도 3.15, 분말도 3312 cm<sup>2</sup>/g인 H사의 1종 포틀랜드 시멘트를 그리고 밀도 2.14, 분말도 3360 cm<sup>2</sup>/g의 플라이애쉬를 사용하였다. 사용된 골재의 물성치는 Table 4에서 보이는

**Table 4** Properties of aggregate

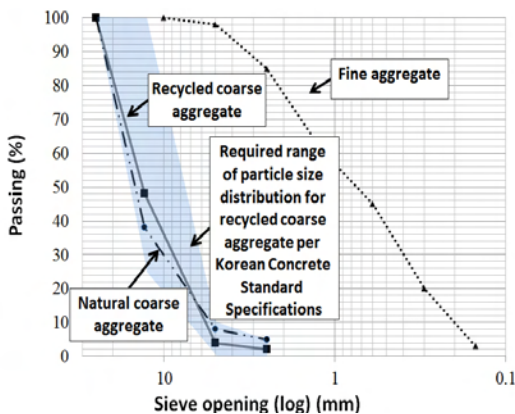
Property of aggregate		Quality standard for recycled coarse aggregate (KCI)	Used aggregates			Test regulation
			Recycled coarse aggregate	Natural coarse aggregate	Fine Aggregate	
Absolute dry density (g/cm <sup>3</sup> )		More than 2.5	2.14	2.62	2.56	KS F 2503
Absorption (%)		Less than 3.0	6.28	0.84	1.41	KS F 2503
Abrasion (%)		More than 40	21.1	14.6	-	KS F 2508
Absolute volume (%)		More than 55	57	59	58	KS F 2527
0.08 mm sieve passing (%)		Less than 1.0	0.6	0.2	1.6	KS F 2511
Alkali aggregate reaction		Harmless	Harmless			KS F 2545
Amount of clay mass (%)		Less than 0.2	0.15	0.08	0.4	KS F 2512
Stability (%)		Less than 12	4.9	2.4	3.5	KS F 2507
Contents of impurity (%)	Organic	Less than 1.0 (volume)	0.2	-	-	KS F 2576
	Inorganic	Less than 1.0 (volume)	0.2	-	-	

바와 같이 순환굵은골재는 천연굵은골재에 비해 밀도가 낮고 흡수율이 6% 이상으로 높은 특징이 있다. 이는 이 실험에서 사용한 순환골재의 생산과정은 폐콘크리트의 모르타르를 제거하는 과정이 없기 때문에 순환골재에 포함된 다량의 모르타르와 시멘트 페이스트의 영향인 것으로 볼 수 있다.

이 실험에서 사용한 순환굵은골재는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 품질 기준에 비해 낮은 밀도와 높은 흡수율을 가진다. 실험에서 굵은골재로 사용된 천연골재는 최대치수 25 mm의 쇄석이었고 순환골재의 최대치수 역시 25 mm이며 입도 분포와 안정성 등의 항목은 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 조건을 만족하였다. 잔골재는 Fig. 3에서 나타내는 것과 같은 입도분포를 보인다.

### 2.3 배합

콘크리트 배합설계에서 물-결합재비는 설계강도 24 MPa과 40 MPa에 대해서 0.43과 0.32로 결정하였고, 잔골



**Fig. 3** Particle size distribution curve of aggregates

재율은 42%로 선정하였다.

플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 결합재량에 대해 치환율 30%로 배합하였고, PC계 고유동화제는 24 MPa 배합에서 결합재량의 0.3%, 40 MPa 배합에서 결합재의 1%를 사용하였다.

### 3. 실험 방법

이 연구에서는 순환골재를 활용한 콘크리트의 유동성과 압축강도 및 쪼갬인장강도에 대해서 실험을 실시하였다. 각각의 실험 방법은 다음에 기술하였다.

#### 3.1 콘크리트 유동성 시험

굳지 않은 순환골재 콘크리트의 작업성(workability)과 유동성(rheology)을 평가하기 위해 Fig. 4에서 보이는 것과 같은 ICAR 레오미터를 이용하여 유동곡선실험(flow curve test)을 실시하였고, 슬럼프 테스트 결과와 비교하였다. 콘크리트 배합 후 즉시 KS F 2402에 따라 슬럼프



**Fig. 4** ICAR rheometer system

**Table 5** Mixing proportions (kg/m<sup>3</sup>)

Mixture case	Water	Cement	Natural coarse aggregate	Fine aggregate	Recycled coarse aggregate	Fly ash	AE
N-SSD-0	159	369	1,060	691	-	-	1.11
NF-SSD-0	159	258	1,060	691	-	75	1.11
N-SSD-30	159	369	742	691	273	-	1.11
NF-SSD-30	159	258	742	691	273	75	1.11
N-SSD-100	159	369	-	691	911	-	1.11
NF-SSD-100	159	258	-	691	911	75	1.11
N-OD-100	159	369	-	691	911	-	1.11
H-SSD-0	159	495	1,034	614	-	-	4.95
H-SSD-30	159	495	724	614	266	-	4.95
H-SSD-100	159	495	-	614	888	-	4.95
HF-SSD-100	159	347	-	614	888	101	4.95

테스트를 진행함과 동시에 ICAR 레오미터를 이용하여 유동곡선실험을 실시하였다.

ICAR 레오미터는 빙햄모델(Bingham model)에 의해 정의된 동적항복응력(dynamic yield stress)과 소성점도(plastic viscosity)를 결정하기 위한 장치이다. 실험방법을 간단히 설명하자면, 직경 286 mm인 용기에 배합된 콘크리트를 균지 않은 상태로 약 300 mm 높이까지 채웠다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 직경과 높이가 127 mm인 회전날개(vane)를 용기의 중앙 부위 콘크리트 속에 위치시키고, 콘크리트의 점성을 일정하게 유지하기 위해 약 20초 동안 0.5 rev/s의 일정한 속도로 회전한 후, 회전속도를 30초에 걸쳐 0.5 rev/s에서 0.05 rev/s로 감소시켜 가면서 회전날개에 발생하는 비틀림 모멘트 값을 5초마다 7회를 측정하였다. 이를 통해서 회전날개의 회전속도와 비틀림 모멘트에 대한 관계식(선형 유동곡선)을 얻을 수 있으며, 이 직선의 수직축 절편과 기울기를 기반으로 아래 식으로 표현되는 빙햄모델의 동적항복응력(Pa)과 소성점도(Pa.s)를 결정할 수 있다.<sup>19)</sup>

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 전단응력(shear stress, Pa),  $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도(shear strain rate, 1/s)를 나타낸다.

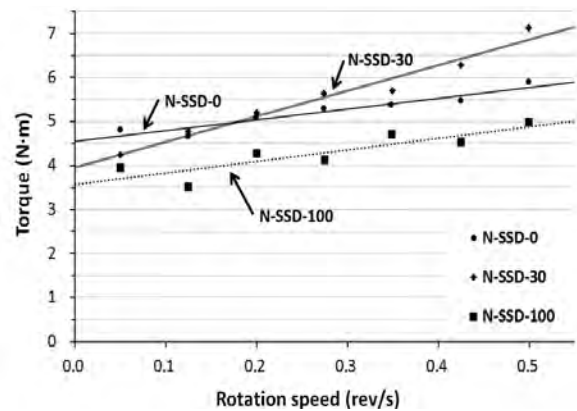
### 3.2 압축 및 쪼갬인장강도 시험

압축 및 쪼갬인장강도 실험은 KS F 2403에 따라 제작된 크기의 원주형 공시체를 이용하였다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 공시체 제작일로부터 7일, 28일, 91일 후에 각각 측정하였으며, 쪼갬인장강도는 KS F 2423에 따라 28일, 91일 후에 각각 측정하였다.

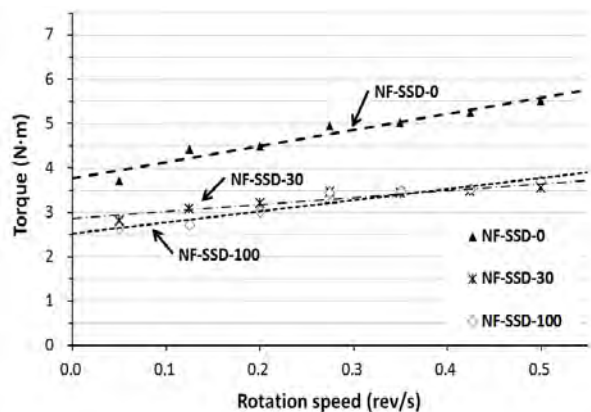
## 4. 실험 결과

### 4.1 콘크리트의 유동성

균지 않은 콘크리트를 대상으로 유동곡선실험을 통해서 얻은 실험 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5에서 포틀랜드 시멘트만을 결합재로 사용한 콘크리트의 순환골재 치환율(0%, 30%, 100%)에 따른 유동곡선을 보여



**Fig. 5** Flow curve of specimens not containing fly ash



**Fig. 6** Flow curve of specimens containing fly ash

**Table 6** Test results of slump and flow curve

	N-SSD-0	N-SSD-30	N-SSD-100	NF-SSD-0	NF-SSD-30	NF-SSD-100
Slump (mm)	77	88	131	116	182	190
Yield stress (Pa)	1,180	833	619	1,016	780	590
Plastic viscosity (Pa.s)	21.4	86.3	75.5	27.8	10.0	32.2

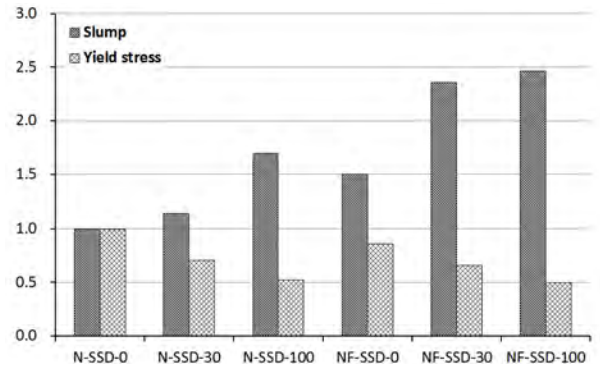
주고 있으며, Fig. 6에서 포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬를 혼용한 콘크리트의 순환골재 치환율에 따른 유동곡선을 보여주고 있다. 각각의 그래프는 회전날개(vane)를 일정한 속도로 회전시키기 위해 필요한 비틀림 모멘트(torque) 값의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 비틀림 모멘트 값이 작을수록 유동성이 크다고 할 수 있다.

Fig. 5 및 6에서 보는 바와 같이 순환골재의 사용이 콘크리트의 유동성을 대체적으로 증가시키는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 플라이애쉬를 함유한 콘크리트에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반면, 플라이애쉬를 함유하지 않고 순환골재 치환율이 30%인 콘크리트의 경우 회전날개의 회전속도가 0.2 rev/s 이상일 때 천연골재만을 사용한 콘크리트보다 더 큰 비틀림 모멘트를 요구하였다. 한편, 순환골재 치환율이 30%와 100%인 두 가지 콘크리트 간에는 유동곡선의 차이가 일정하게 드러나지 않았다.

또한, 회전속도를 고려하지 않을 때 플라이애쉬를 함유하지 않은 콘크리트의 비틀림 모멘트 값의 범위가 약 3.5 N·m에서 7.1 N·m로 나타났다. 하지만, 플라이애쉬를 함유한 콘크리트의 비틀림 모멘트 값은 약 2.6 N·m에서 5.5 N·m의 범위에 분포하였다. 따라서 플라이애쉬의 사용이 콘크리트의 유동성 향상에 기여한 것을 확인하였다.

순환골재 사용이 콘크리트 유동성을 향상시키는 이유로는 순환골재 표면에 존재하는 흡수율 높은 시멘트 페이스트의 공극에 포함된 수분이 단위수량을 증가시켜 발생한 것으로 추정할 수 있다. 또한, 실험에 사용되었던 천연골재(부순 자갈)의 각진 형상에 비해 순환골재의 표면은 시멘트 페이스트에 의해 상대적으로 둥근 형상을 지니고 있었는데, 이러한 순환골재의 형상도 콘크리트의 유동성 향상에 기여했을 것이라 추정된다. 또한, 플라이애쉬의 사용이 유동성을 증가시킨 원인으로는 시멘트 보다 미세한 플라이애쉬의 분말도와 구형입자로 인한 시멘트 페이스트와 골재 간에 연속입도 분포를 형성함에 인해서 마찰저항이 감소했기 때문이다.<sup>9)</sup>

Table 6에 슬럼프, 항복응력(yield stress) 및 소성점도(plastic viscosity) 값을 정리하였다. 슬럼프 실험 결과를 보면, 순환골재 치환율이 증가함에 따라 슬럼프가 증가했음을 알 수 있다. 순환골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프 증가율은 플라이애쉬 혼입 여부에 상관없이 비슷하게 발생하였다. 순환골재 치환율이 100%인 경우 천연골재만 사용한 콘크리트에 비해 약 65-70% 정도 슬럼프가 증가하였다.



**Fig. 7** The relative values of slump and yield stress based on N-SSD-0

또한, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트는 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 약 45-100% 정도 높은 슬럼프 값을 보였다. 따라서, 순환골재의 활용과 플라이애쉬의 혼입이 콘크리트 유동성 향상에 크게 기여한다는 것을 확인하였다. 순환골재 콘크리트의 소성점도는 천연골재만을 사용한 경우와 비교할 때 일정한 경향을 보이지 않았으나, 플라이애쉬를 함유한 콘크리트는 플라이애쉬를 함유하지 않은 경우에 비해 상당히 낮은 소성점도를 보였다. Fig. 7에서는 N-SSD-0을 기준으로 각 종류별 콘크리트의 슬럼프와 항복응력의 상대치를 나타내었다. 이를 통해, 순환골재의 치환율이 증가할수록 항복응력이 감소하는 것을 발견할 수 있다. 이를 통해서 슬럼프와 항복응력은 대략적으로 반비례 관계에 있는 것을 확인하였다. 또한, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 경우에 비해 조금 낮은 항복응력을 나타낸 것을 볼 수 있다. 그러나, 플라이애쉬 혼입 유무에 따라 발생한 현저한 슬럼프의 변화는 같은 배합을 이용한 콘크리트의 항복응력에서 나타나지 않았다. 이러한 현상은 플라이애쉬의 사용으로 인해서 낮아진 소성점도가 슬럼프 증가에 기여했기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.2 콘크리트의 압축강도

설계배합이 각기 다른 시험체들의 7일, 28일, 91일 압축강도를 Fig. 8과 9에서 보여주고 있다. 실험 결과에 따르면, 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 감소하는 경향이 나타난다. 각각의 변수에 대해 재령일 28일을 기준으로 순환골재 치환율에 따른 강도감소를 나타내었다. 설계강도가 24 MPa이고 플라이애쉬를 함유하지 않은 콘크리트의 경우, 순환골재를 30%와 100%

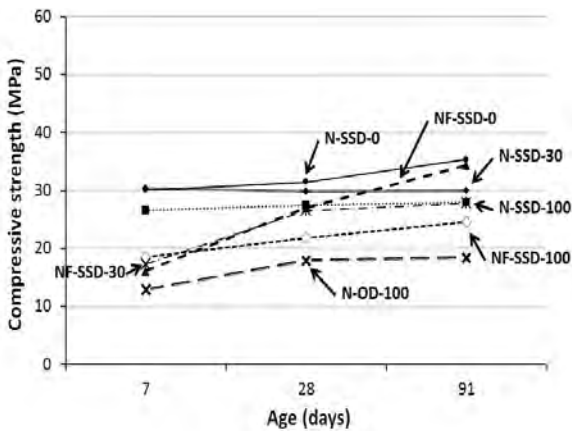


Fig. 8 Compressive strength (design strength: 24 MPa)

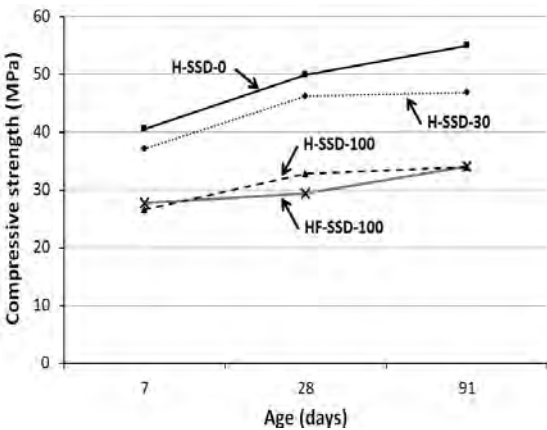


Fig. 9 Compressive strength (design strength: 40 MPa)

치환하였을 때 순환골재를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 각각 약 3%와 13%가 감소하는 것으로 나타났다. 같은 설계강도에 플라이애쉬를 사용한 경우, 순환골재 치환율 30%의 콘크리트 강도는 순환골재를 사용하지 않은 콘크리트와 같았으며 100% 순환골재를 사용한 콘크리트는 약 19% 낮은 압축강도를 기록하였다. 설계강도가 40 MPa인 콘크리트의 압축강도는 순환골재 치환율이 30%, 100%로 증가할수록 천연골재만을 함유한 콘크리트에 비해 각각 약 8%, 34%씩 감소하는 것으로 나타났다.

순환골재를 사용한 콘크리트의 경우 양생일수 91일 강도는 7일 강도에 비해서 거의 증가하지 않았으며, 이로 인하여 천연골재만을 사용한 콘크리트와 강도차이는 시간이 지날수록 더욱 뚜렷하게 나타나는 경향을 보였다.

플라이애쉬를 사용하지 않은 24 MPa 콘크리트의 재령일 7일 대비 91일 압축강도 증가율을 살펴보면, 천연골재를 사용하였을 때 17%가 증가한 반면 치환율 30%, 100% 콘크리트는 각각 0%, 5% 가량으로 나타났다. 설계강도가 40 MPa인 콘크리트 역시 천연골재를 사용하였을 때 36%가 증가한 반면 치환율 30%, 100% 콘크리트는 각각 26%, 28%를 기록하였다.

플라이애쉬의 혼입이 압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 순환골재의 치환율과 함수상태가 같고 시멘

트의 30%를 플라이애쉬로 대체한 콘크리트와 시멘트만 사용한 콘크리트의 압축강도를 비교하였다. 결합재로 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트는 시멘트만을 사용한 콘크리트에 비해 재령일 91일을 기준으로 순환골재 치환율 0, 30%, 100%에 대해서 각각 약 3%, 7% 12%의 낮은 강도를 나타냈다. 반면, 재령일 7일을 기준으로 46%, 43% 30%씩 낮은 강도를 보였다. 이는 플라이애쉬의 혼입이 양생일수에 상관없이 압축강도를 저하시켰으나, 양생일수가 길어짐에 따라 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 포졸란 반응 등의 영향으로 강도를 발현함으로써 차이가 줄어드는 것으로 볼 수 있다. 하지만 설계강도가 40 MPa인 100% 순환골재를 사용한 콘크리트의 경우 플라이애쉬의 사용이 콘크리트 강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

위의 결과에 비추어 볼 때, 콘크리트 표준시방서에서 제시한 바와 같이 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반 콘크리트와 압축강도의 차이가 비교적 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 플라이애쉬가 혼입되지 않은 경우, 순환골재가 100% 사용된 콘크리트의 28일 압축강도는 27 MPa로 설계강도인 24 MPa를 만족하는 결과를 보였다. 플라이애쉬가 혼입된 콘크리트의 경우, 순환골재가 30% 치환된 콘크리트의 압축강도가 27 MPa를 보이며 설계강도를 만족하였다. 하지만, 플라이애쉬와 100% 순환골재로 배합된 콘크리트의 28일 압축강도는 22 MPa로 설계강도를 만족하지 못하였다. 또한, 고강도로 설계된 콘크리트의 결과에서 볼 수 있듯이 순환골재의 사용으로 인한 압축강도의 감소를 물-결합재비를 조절하여 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 압축강도의 측면에서 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 순환골재의 치환율 30% 이상을 적용하여도 적절한 물-결합재비의 조절과 플라이애쉬의 혼입으로 구조용 콘크리트 재료로 사용이 가능하다는 것을 보여준다.

순환골재의 함수상태에 따른 압축 강도 차이를 비교하였다. 설계강도 24 MPa로 순환골재만을 이용하여 제작된 콘크리트를 비교하면, 골재가 절대건조(OD)상태로 사용된 콘크리트(N-OD-100)는 표면건조포화(SSD)상태로 제작된 콘크리트(N-SSD-100)에 비해 양생일수 7일에는 약 52%, 91일에는 약 36% 낮은 압축강도를 발현하였다. 즉, OD상태의 순환골재를 사용한 경우는 양생일수에 상관없이 압축강도를 저하시켰으며, 특히 초기강도가 매우 낮게 나타났다. 이러한 강도 감소는 흡수율이 높은 절대건조상태의 순환골재가 배합시 배합수를 흡수하여 수화작용에 필요한 물이 부족해 졌기 때문이라 추정된다. 표면건조포화상태의 순환골재를 사용한 콘크리트는 7일 대비 28일과 91일 강도 증가율이 각각 약 4%, 5%인데 비해 절대건조상태의 순환골재를 사용한 콘크리트의 7일 대비 28일과 91일 강도 증가율이 각각 약 18%, 33%로 나타났다.

### 4.3 콘크리트 쪼갬인장강도

설계배합이 각기 다른 시험체들의 28일, 91일 쪼갬인장강도를 설계강도가 24 MPa과 40 MPa인 경우에 대해서 Fig. 10과 11에 나타내었다. 실험 결과에 따르면, 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 쪼갬인장강도 역시 감소하는 경향을 나타낸다. 각각의 변수에 대해 재령일 28일을 기준으로 순환골재 치환율에 따른 쪼갬인장강도의 감소 정도를 분석하였다. 설계강도가 24 MPa이고 플라이애쉬를 함유하지 않은 콘크리트의 경우, 순환골재를 30%와 100% 치환하였을 때 순환골재를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 각각 약 15%와 32%의 감소율을 보였다. 같은 설계강도에서 플라이애쉬를 사용한 경우를 살펴보면, 순환골재의 치환율이 30%와 100%인 콘크리트의 강도는 모두 순환골재를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 약 12% 낮은 강도를 기록하였다. 설계강도가 40 MPa인 콘크리트의 쪼갬인장강도는 순환골재 치환율이 30%, 100%로 증가할수록 천연골재만을 함유한 콘크리트에 비해 각각 약 22%, 36%씩 감소하는 것으로 나타났다. 위의 결과는 콘크리트 표준시방서에서 제시한 바와 같이 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반 콘크리트와 쪼갬인장강도의 차이가 비교적 크지 않다는 것을 의

미한다. 하지만, 순환골재의 치환율에 따른 강도의 감소율은 압축강도에서 보다 인장강도에서 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

천연골재만을 사용한 콘크리트의 경우 양생일수 91일 강도는 28일 강도에 비해서 거의 증가하지 않았으며, 이로 인하여 순환골재 치환율이 높은 콘크리트와 강도차이가 줄어드는 경향을 보였다. 플라이애쉬를 사용하지 않은 24 MPa 콘크리트의 재령일 28일 대비 91일 압축강도 증가율을 살펴보면, 천연골재를 사용한 콘크리트의 강도는 거의 증가하지 않은 반면 치환율 30%, 100% 콘크리트는 각각 8%, 14%로 나타났다. 설계강도가 40 MPa인 콘크리트 역시 천연골재를 사용하였을 때 1%가 증가한 반면 치환율 30%, 100% 콘크리트는 각각 12%, 14%를 기록하였다. 이러한 현상은 흡수율이 높은 순환골재의 특성에 비추어 볼 때, 골재내부의 물이 비교적 장기간 시멘트의 수화작용을 돕는 내부양생의 효과에 기인한 것으로 예상된다.<sup>20)</sup>

플라이애쉬의 혼입이 콘크리트의 쪼갬인장강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 순환골재의 치환율과 함수상태가 같고 시멘트의 30%를 플라이애쉬로 대체한 콘크리트와 시멘트만 사용한 콘크리트의 쪼갬인장강도를 비교하였다. 결합재로 플라이애쉬가 혼입된 콘크리트는 시멘트만을 사용한 콘크리트에 비해 재령일 91일을 기준으로 순환골재 치환율 0, 30%, 100%에 대해서 각각 약 19%, 13%, 11%가 낮은 강도를 나타냈다. 반면, 재령일 28일을 기준으로 26%, 25%, 6%씩 낮은 강도를 보였다. 이는 플라이애쉬의 혼입이 양생일수에 상관없이 압축강도를 저하시켰지만, 재령일수가 길어짐에 따라 플라이애쉬의 혼입이 콘크리트가 포졸란 반응의 영향으로 장기강도를 발현함으로써 차이가 줄어드는 것으로 보인다. 또한, 설계강도가 40 MPa이고 순환골재만을 사용한 콘크리트의 경우, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트 강도가 시멘트만 사용한 콘크리트에 비해 28일과 91일에서 모두 큰 쪼갬인장강도를 보였다.

순환골재의 함수상태에 따른 쪼갬인장강도 차이를 비교하였다. 설계강도 24 MPa로 순환골재만을 이용하여 제작된 콘크리트를 비교하면, 골재가 절대건조(OD)상태로 사용된 콘크리트(N-OD-100)는 표면건조포화(SSD)상태로 제작된 콘크리트(N-SSD-100)에 비해 양생일수 28일에는 약 48%, 91일에는 약 50% 낮은 쪼갬인장강도를 발현하였다. 쪼갬인장강도 실험에서도 역시 OD상태의 순환골재를 사용한 경우는 양생일수에 상관없이 쪼갬인장강도를 저하시키는 것으로 나타났다. 이러한 강도 감소는 압축강도와 마찬가지로 흡수율이 높은 절대건조상태의 순환골재의 배합수 흡수로 인한 것이라 추정된다. 표면건조포화상태와 절대건조상태의 순환골재를 사용한 콘크리트의 28일 대비 91일 강도 증가율은 각각 약 14%, 13%로 나타났다.

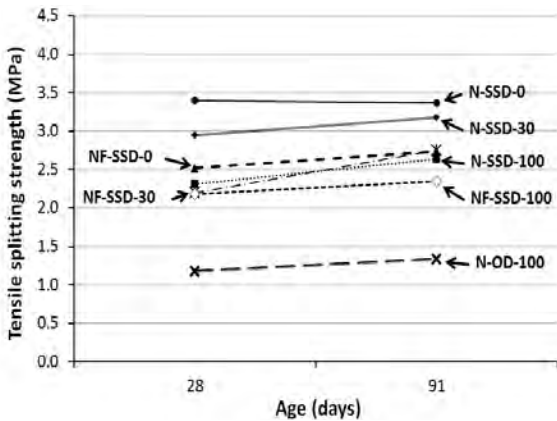


Fig. 10 Splitting tensile strength (design strength: 24 MPa)

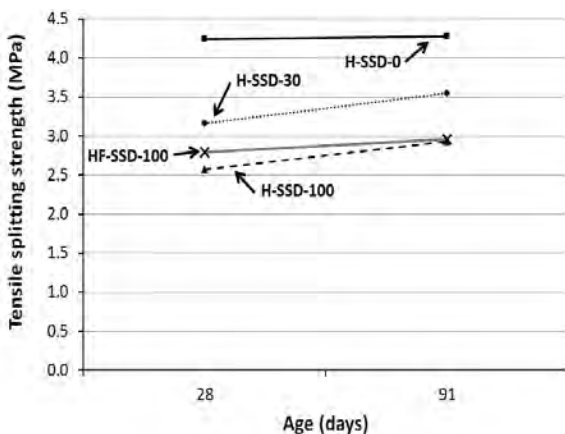


Fig. 11 Splitting tensile strength (design strength: 40 MPa)



## 5. 결 론

이 연구는 설계강도, 굵은골재의 순환골재 치환율, 플라이애쉬 혼입 유무, 골재의 함수상태에 따른 콘크리트 유동성 및 강도 특성을 비교하였다.

- 1) 순환골재의 치환율이 증가함에 따라 콘크리트의 슬럼프가 증가하였다. 또한, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트는 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 약 45-100% 정도 높은 슬럼프 값을 보였다. 따라서, 순환골재의 활용과 플라이애쉬의 혼입이 콘크리트 유동성 향상에 크게 기여한다는 것을 확인하였다.
- 2) 순환골재 콘크리트의 소성점도는 천연골재만을 사용한 경우와 비교할 때 일정한 경향을 보이지 않았지만 플라이애쉬를 함유한 순환골재 콘크리트는 플라이애쉬를 함유하지 않은 경우에 비해 상당히 낮은 소성점도를 보였다. 순환골재의 치환율이 증가할수록 항복응력이 감소하였으며, 이를 통해서 슬럼프와 항복응력은 대략적으로 반비례 관계에 있는 것을 확인하였다. 또한, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 경우에 비해 조금 낮은 항복응력을 나타내었다.
- 3) 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 감소하는 경향이 나타났으며, 콘크리트 표준시방서에서 제시한 바와 같이 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반 콘크리트와 압축강도의 차이가 비교적 크지 않았다. 플라이애쉬 콘크리트의 초기강도는 낮은 압축강도를 보였으나, 91일 장기강도는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 콘크리트와 동등한 강도특성을 보였다. OD상태의 순환골재를 사용한 경우는 양생일수에 상관없이 압축강도를 저하시켰으며, 특히 초기강도가 매우 낮게 나타났다.
- 4) 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 쪼갬인장강도 역시 감소하는 경향을 나타낸다. 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반 콘크리트와 쪼갬인장강도의 차이가 비교적 크지 않지만, 순환골재의 치환율에 따른 강도의 감소율은 압축강도에서 보다 쪼갬인장강도에서 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 플라이애쉬의 혼입은 양생일수에 상관없이 쪼갬인장강도를 저하시켰지만, 재령일수가 길어짐에 따라 플라이애쉬의 혼입이 콘크리트가 포졸란 반응의 영향으로 장기강도를 발현함으로써 차이가 줄어든 것으로 보인다. OD상태 골재를 사용한 콘크리트는 SSD상태로 제작된 콘크리트에 비해 낮은 쪼갬인장강도를 발현하였다.

## 감사의 글

이 연구는 2012년도 지식경제부의 지역연고산업육성사업(RIS) “부생(유)황을 활용한 친환경 건설자재산업 육

성사업”의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. www.cwms.or.kr, Condition of Waste Disposal, Accessed 2012.
2. Korean of Land, Infrastructure and Transport, *Research for Supply Stabilization and Quality Improvement of Aggregate*, 2010, pp. 33-39.
3. Korean Ministry of Environment, *Report for Statistics of Investigation of Recycling*, 2005, pp. 14-15.
4. Korea Concrete Institute, *Concrete Specification and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, 2009, 762 pp.
5. Kou, S. C. and Poon, C. S., “Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 9, 2009, pp. 622-627. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>)
6. Poon, C. S. and Kou, S. C., “Properties of Concrete Prepared with PVA-Impregnated Recycled Concrete Aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, Issue 8, 2010, pp. 649-654. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>)
7. Nassar, Poz-Ud-Din and Soroushian, P., “Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Containing Milled Glass as Partial Replacement for Cement,” *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 2012, pp. 386-377. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>)
8. Yoon, S. J., Seo, S. Y., Lee, W. J., and Kim, D. Y., “Concrete Physical Properties with Substitution Ratio of Recycled Coarse Aggregate and Recycled Fine Aggregate,” *Journal of the Korean Concrete Institute Fall Research Conference*, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 161-164.
9. Han, C. G. and Park, Y. K., “Analysis of Fundamental Properties of Concrete for Rising up Fly Ash Contents,” *Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 6, No. 2, 2011, pp. 89-96.
10. Wallevik, J. E., “Relationship between the Bingham Parameters and Slump,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 36, Issue 7, 2006, pp. 1214-1221. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.001>)
11. M. Barra de Oliveira and E. Vazquez, “Influence of Retained Moisture in Aggregates from Recycling on the Properties of New Hardened Concrete,” *Waste Management*, Vol. 16 No. 1-3, 1996, pp. 113-117. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X\(96\)00033-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(96)00033-5))
12. Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., and Kou, S. C., “Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, Issue 1, 2003, pp. 31-36. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8))
13. Berndt, M. L., “Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate,” *Construction*

- and *Building Materials*, Vol. 23, Issue 7, 2009, pp. 2606-2613. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011>)
14. Xiao, J., Li, J., and Zhang, C., "Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Loading," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 35, 2005, pp. 1187-1194. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>)
  15. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., and Sulieman, M. Z., "Influence of the Amount of Recycled Coarse Aggregate in Concrete Design and Durability Properties," *Construction and Building Materials*, Vol. 26, Issue 1, 2012, pp. 565-573. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>)
  16. Sim, J. S., Park, C. W., Moon, I. W., and Lee, H. C., "Fundamental Performance Evaluation of Recycled Aggregate Concrete with Varying Amount of Fly Ash and Recycled Fine Aggregate," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 5, 2005, pp. 793-801.
  17. Chung, H. S., Yang, K. H., and Kim, H. H., "The Influence of the Quality and the Replacement Level of Recycled Aggregate on the Mechanical Properties of Concrete," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 22, No. 6, 2006, pp. 71-78.
  18. Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., and Jiang, J., "Effect and Mechanism of Surface-Coating Pozzolanic Materials around Aggregate on Properties and ITZ Microstructure of Recycled Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 5, 2010, pp. 701-708. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038>)
  19. Sofiane Amziane, Shiara F. Ferraris, Eric Koehler, "Feasibility of Using a Concrete Mixing Truck as a Rheometer," NISTIR 7333, US, 2006, 43 pp.
  20. Weiss, J., Bentz, D., Schindler, A. P. E., Lura, P., "Internal Curing," *Structure Magazine*, January 2012, pp. 10-14.

**요 약** 건설폐기물의 증가에 따라 지속가능한 기술로 폐콘크리트의 재사용에 대한 연구가 활발해지고 있다. 따라서 이 연구에서는 순환골재를 활용한 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 쪼갬인장강도에 대한 특성을 조사하였다. 실험변수로는 콘크리트의 설계강도, 순환골재의 함수상태, 총 굵은골재량에 대한 순환굵은골재의 치환율, 플라이애쉬 사용 유무 등을 사용하여 11가지 경우에 대한 시험체 제작과 실험을 계획하였다. 굳지 않은 순환골재 콘크리트의 유동성을 평가하기 위해 ICAR 레오미터를 이용하여 유동곡선실험을 실시하였고, 슬럼프 실험 결과와 비교하였다. 순환골재와 플라이애쉬의 사용은 슬럼프와 유동곡선 모두 콘크리트의 유동성을 향상시키는 결과를 얻었다. 순환골재의 치환율이 증가할수록 항복응력이 감소하였으며, 이를 통해서 슬럼프와 항복응력은 대략적으로 반비례 관계에 있는 것을 확인하였다. 또한 플라이애쉬를 함유한 순환골재 콘크리트는 플라이애쉬를 함유하지 않은 경우에 비해 상당히 낮은 소성점도를 보였다. 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도, 쪼갬인장강도는 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였고, 순환골재를 30% 이상 치환한 경우는 이러한 경향이 보다 뚜렷하게 보였다. 순환골재를 30% 치환하고, 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 장기강도 증진에 도움이 되는 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 순환골재, 플라이애쉬, 유동성, 압축강도, 쪼갬인장강도