

## 순환굵은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨강도

양인환<sup>1\*</sup>, 안슬기<sup>2</sup>, 황철성<sup>3</sup>

# Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate

In-Hwan Yang<sup>1\*</sup>, Seul-Ki An<sup>2</sup>, Chul-Sung Hwang<sup>3</sup>

**Abstract:** This paper concerns flexural strength of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate (RCA) with compressive strength ranging from 31 to 38 MPa. The experimental parameters were replacement ratio of RCA and rebar ratio. Replacement ratio of RCA was 0, 30, 50 and 100%, and rebar ratio was 0.50, 0.79 and 1.14%. The RCA concrete beams were tested by using four-point bending test, and experimental results were discussed regarding crack and failure patterns, load-deflection relationship. Crack pattern of concrete beams with RCA was similar to that of concrete beams with natural coarse aggregate (NCA) but overall crack spacing of concrete beams with RCA was smaller than that of concrete beams with NCA. The crack width of RCA and NCA concrete beams was similar to each other. In addition, the test results of flexural strength were compared to the design code predictions. The design code predictions for flexural strength underestimated the experimental results. Therefore, the design code predictions for flexural strength of RCA concrete beams would offer conservative design.

**Keywords:** Recycled coarse aggregate, Aggregate replacement ratio, Rebar ratio, Crack, Flexural strength

## 1. 서 론

1970~80년대부터 건설된 콘크리트 구조물은 현재 수명이 다하여 재건축, 재개발 사업이 이루어지는 상황에서 건설폐기물의 비율도 점차 증가하고 있는 실정이다. 건설폐기물의 단순 매립은 국토의 환경훼손 가능성과 부담을 가중시키는 원인으로 작용하고 있다(Jang et al., 2003; Kim et al., 1996; Choi et al., 2007; Kim et al., 2012).

건설폐기물의 환경 문제를 해결하기 위한 대안으로서 건설폐기물에서 생산한 순환골재 활용의 확대를 도모하기 위한 정책을 시행하고 있다. 그러나 아직까지 순환골재에 대한 인식의 부족과 연구결과의 한계때문에 도로용, 성토 및 복토 등의 비구조용 콘크리트에 순환골재의 사용이 많은 부분을 차지하고 있다(Yang and Kim, 2016).

순환골재 콘크리트를 구조용 부재로 사용하기 위한 기초연

구로서 Bai and Sun(2010)은 순환골재를 사용하여 치환률이 50, 70 및 100%인 부재의 휨실험을 수행하였다. 그들의 시험 결과는 균열패턴은 비슷하나 순환골재 치환률이 증가함에 따라 처짐과 균열폭이 증가하는 것을 나타낸다. 또한, 순환골재 치환률이 부재의 균열모멘트와 최대모멘트에 영향을 미치지 않는 것으로 결론을 내렸다. Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2007)은 순환골재를 부분적 또는 전체적으로 사용한 200 × 300 mm 사각단면의 보 부재 실험을 수행하였으며, 순환골재 콘크리트 부재는 일반콘크리트 부재에 비해 낮은 모멘트(평균 3.5%)와 높은 처짐을 나타내었다. Sato et al.(2007)은 순환골재 콘크리트는 천연골재 콘크리트에 비해 더 낮은 압축강도와 탄성계수를 가지는 반면에, 더 큰 크리프와 건조수축을 나타낸다고 결론을 내렸다. Kim et al.(2012)은 천연굵은골재와 3%와 6%의 흡수율을 갖는 순환굵은골재를 사용한 철근콘크리트 보의 실험연구를 수행하여 전단변형의 구조성능에 대한 영향을 평가하였다. Kang et al.(2014)은 순환굵은골재 치환률을 50%까지로 하여 휨 부재의 거동실험연구를 수행하였다. Lee et al.(2014)은 순환골재 치환률에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 휨거동을 연구하였다. 또한, Arezoumandi et al.(2015)는 철근비 0.64% 이하의 순환골재 콘크리트의 휨성능 연구를 수행하였다.

또한 KS F 2573(2011)에서는 구조용 콘크리트의 순환골재

<sup>1</sup>정회원, 군산대학교 토목공학과 정교수, 교신저자

<sup>2</sup>학생회원, 군산대학교 토목공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

\*Corresponding author: ihyang@kunsan.ac.kr

Kunsan National University, 539, Daehak-ro, Gunsan-si, Jeollabuk-do 54151, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

함유량을 전체골재 용적량의 30% 이하로 제한되어 있으며, 또한 콘크리트의 설계압축강도가 최대 27 MPa까지로 규정되어 있다. 이에 따라, 국내의 다수의 기존연구(Kim et al., 1993; Kim et al., 1996; Song et al., 2009)는 KS F 2573(2011)을 만족하는 고품질의 순환골재를 사용한 압축강도 27 MPa 이하의 콘크리트 부재에 대한 실험연구가 주로 수행되었다.

따라서 이 연구에서는 굵은골재를 0, 30, 50 및 100%의 순환굵은골재로 치환하여 압축강도 31~38 MPa 수준의 순환골재 콘크리트의 보 부재의 휨거동 실험연구를 수행하였다. 또한 콘크리트구조기준(KCI, 2012)의 강도설계법 또는 도로교설계기준(MOLIT, 2012)의 한계상태설계법에 의해 순환골재 콘크리트 보의 정밀 휨성능평가를 수행하기 위해서는 다양하고 방대한 콘크리트의 재료특성시험자료 및 휨강도 측정값과 코드예측값의 비교분석이 필요하며, 이러한 관점에서 본 실험자료는 유용한 연구자료가 될 수 있다고 판단된다.

## 2. 순환골재 콘크리트 및 보 부재 실험계획

### 2.1 사용재료 및 배합

천연굵은골재는 부순자갈로써 최대직경 25 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였고, 순환굵은골재는 최대직경 13 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였다. 순환골재는 가공단계에서 골재 표면에 부착된 모르타르를 제거하기 위해 파쇄 및 마쇄 단계를 거친다. 이러한 단계를 거치는 동안 골재의 최대 크기는 불가피하게 감소하는 경향이 있다. 이에 따라 이 연구에서의 순환굵은골재의 최대크기는 천연굵은골재의 최대크기보다 작다.

잔골재는 부순모래와 해사를 7:3의 비율로 섞은 혼합잔골재를 사용하였다. Fig. 1에 실험에 사용된 골재를 나타내었다. 굵은골재 및 잔골재의 밀도와 흡수율을 KS F 2503(2007) 및 KS F 2504(2007)를 이용하여 측정하였으며, Table 1에 실험



Fig. 1 Aggregates used in concrete mixtures

Table 1 Properties of aggregate

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	Fineness modulus	Maximum diameter (mm)
Recycled coarse aggregate	2.49	2.95	5.36	13
Natural coarse aggregate	2.62	0.57	6.55	25

에 사용된 골재의 밀도, 흡수율 및 조립률의 실험결과를 나타내었다.

Table 2에 순환골재 콘크리트의 배합설계를 나타내었다. 배합 설계 시에 순환굵은골재 치환율을 실험변수로 고려하였다. 실험변수로써 고려된 굵은골재를 30, 50 및 100%의 순환굵은골재로 용적치환을 하였다. 현행 KS 기준의 순환골재 치환률 제한량이 30%일지라도 그 이상 범위에서의 순환골재 콘크리트의 물성을 파악하기 위해 순환골재 치환률을 100%까지 적용하였다.

골재의 표면상태는 표면건조내부포화상태(saturated surface-

Table 2 Mix proportions for concrete beams containing recycled coarse aggregate

RCA replacement ratio (%)	w/c	Water(w)	Cement(c)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				HRWR* (weight by binder, %)
				Fine aggregate	Coarse aggregate			
					Natural	Recycled		
R000-series	0	0.38	183	482	767	888	0	0.70
R030-series	30	0.38	183	482	767	622	253	0.75
R050-series	50	0.38	183	482	767	444	422	0.80
R100-series	100	0.38	183	482	767	0	844	1.00

\* High-ranging water reducer

dried)로 배합에 사용하였다. 물-결합제 비를 38.0%를 계획하였으며, 잔골재율은 46.4%로 계획하였다. 또한, 순환골재 콘크리트의 작업성을 확보하기 위해 고성능감수제를 사용하였다. 순환골재의 흡수율이 천연골재의 흡수율보다 크므로 배합 시 단위수량에 주의를 기울여야 한다. 본 실험연구에서는 순환골재의 흡수율 변동효과를 고려하기 위하여 사전 배합을 통하여 고성능감수제의 사용량을 파악하였으며, 이에 따라 Table 2의 고성능감수제 사용량을 배합마다 다르게 설정하였다.

### 2.2 재료특성 실험

순환골재 콘크리트 보 부재를 제작 할 때, 콘크리트의 타설 배치(batch)마다 5개의 원주형 공시체(100 × 200 mm)와 직사각형 빔 몰드(100 × 100 × 400 mm)를 제작하였다. 압축강도 실험 시에 LVDT를 이용하여 하중재하시 변위를 측정하였다. 측정변위값을 이용하여 변형률을 산정하였다. 하중재하는 2,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 변위제어 방식으로 하중을 0.8 mm/min의 속도로 재하하였다. 압축응력-변형률 곡선에서 변형률이 0.00005인 점과 최대 하중의 40%에 해당하는 점의 선분의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

또한, 4점휨인장 실험을 통하여 콘크리트의 파괴계수를 측정하였다.

### 2.3 휨 부재 실험계획 및 방법

보의 단면폭은 200 mm, 높이 300 mm의 직사각형 단면형상으로서, 보의 길이는 3,300 mm인 12개의 부재를 제작하였다.

실험변수는 순환골재 치환률과 휨철근비를 고려하였다. 순환골재치환률별로 D13, D16 및 D19 철근을 두가닥씩 사용하여 철근비를 0.50, 0.79 및 1.14%로 적용하였다. 철근의 공칭 항복강도는 400 MPa(SD 400철근)를 적용하였다.

실험 부재는 인장파괴를 유도하기 위하여 인장지배단면으로 고려하였다. Table 3의 부재명에서 S1(0.50%), S2(0.79%) 및 S3(1.14%)는 사용된 철근비를 나타낸다. 주철근에 대한 순회복 두께는 40 mm이며, Fig. 2에 순환골재 콘크리트 보의 단면형상을 나타내었다.

하중 재하점 사이의 거리 600 mm 구간을 순수 휨구간으로 계획하여 휨 거동 영향을 파악하고자 하였다. 순수 휨구간을 제외한 좌·우 구역에는 철근직경 D10을 갖는 전단철근을 150 mm 간격으로 배근하여 전단파괴를 방지하고자 하였다.

수직 액츄에이터(actuator)를 통해 4점 하중재하방식으로 하중을 단계별로 재하하였다(Fig. 3). 시편의 양쪽 단부로부터 150 mm 위치에 강제 로울러를 이용하여 단순지지점으로 하였으며, 지점 사이의 거리는 3,000 mm로 구성하였다. 하중 가력점은 보의 중앙단면에서 좌·우로 각각 300 mm 떨어진 곳에 위치하며, 가력점 사이의 600 mm구간에 순수 휨이 작용

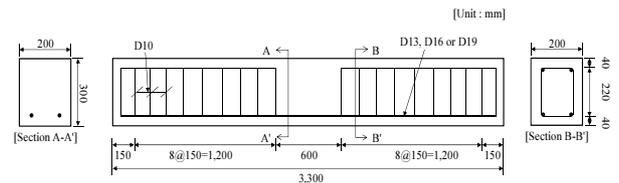


Fig. 2 Dimension of test beam

Table 3 Concrete properties and experimental parameters of the test beams

Test beam	Concrete properties				Experiment parameters	
	Compressive strength(28 days) (MPa)	Elastic modulus (28 days) (MPa)	Rupture modulus (28 days) (MPa)	RCA replacement ratio(%)	Tensile rebar size	Rebar ratio(%)
R000-S1	38.3	22,690	4.7	0	2 × D13	0.50
R000-S2	38.3	22,690	4.7	0	2 × D16	0.79
R000-S3	38.3	22,690	4.7	0	2 × D19	1.14
R030-S1	35.6	21,890	4.6	30	2 × D13	0.50
R030-S2	35.6	21,890	4.6	30	2 × D16	0.79
R030-S3	35.6	21,890	4.6	30	2 × D19	1.14
R050-S1	33.2	20,660	4.4	50	2 × D13	0.50
R050-S2	33.2	20,660	4.4	50	2 × D16	0.79
R050-S3	33.2	20,660	4.4	50	2 × D19	1.14
R100-S1	31.7	18,920	3.9	100	2 × D13	0.50
R100-S2	31.7	18,920	3.9	100	2 × D16	0.79
R100-S3	31.7	18,920	3.9	100	2 × D19	1.14

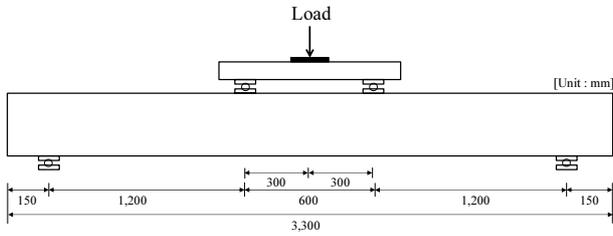


Fig. 3 Dimension of test setup

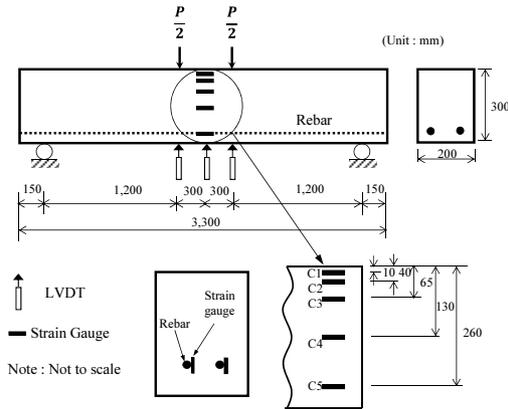


Fig. 4 Instrumentation system

하도록 하였다. 하중재하방법은 변위제어로 하였으며, 1.5 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다.

부재의 계측시스템 구성도를 Fig. 4에 나타내었다. 부재 중앙과 양쪽 재하점에 3개의 LVDT를 설치하여 처짐을 측정하였으며, 순수휨 구간의 철근에 변형률게이지를 부착하여 철근변형률을 측정하였다. 또한, 단면의 콘크리트 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 표면에 변형률 게이지를 5개 부착하였다. 또한, 100 mm 용량의 파이게이지(Pi-gauge)를 압축영역과 인장영역에 각각 부착하여 단면에서 발생하는 변형률을 산정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 콘크리트 및 철근 재료 실험결과

순환골재 치환률(0, 30, 50, 100%)에 따른 콘크리트의 평균 압축강도, 탄성계수 및 파괴계수 측정결과를 Table 3에 나타내었다. 순환골재 치환률 별 압축강도 평균값은 38.3, 35.6, 33.2 및 31.7 MPa이다(Fig. 5). 탄성계수의 평균값은 22690, 21890, 20660 및 18920 MPa이고, 파괴계수는 4.7, 4.6, 4.4 및 3.9 MPa이다.

순환골재 콘크리트 부재 제작 시에 공칭강도 SD 400의

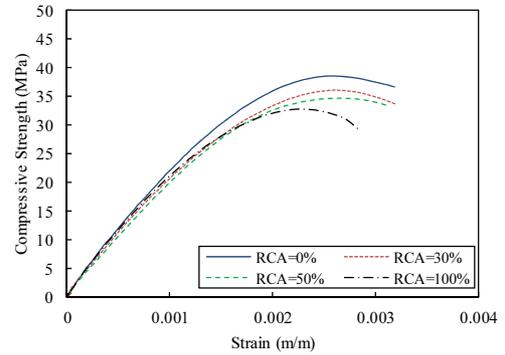


Fig. 5 Compressive stress-strain curve

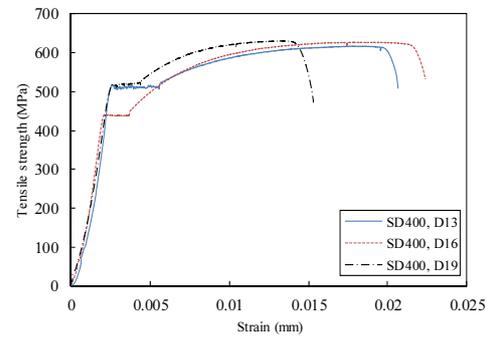


Fig. 6 Tensile stress-strain curve

D13, D16 및 D19 철근을 사용하였다. 부재 제작에 사용한 철근의 인장시편을 이용하여 철근인장실험을 수행하였다. 철근의 인장강도 실험은 KS B 0802 규정에 따라 수행하였고, D13, D16 및 D19 철근의 항복강도는 각각 516, 435 및 518 MPa로써 공칭강도(400 MPa)보다 크게 나타났다(Fig. 6).

#### 3.2 부재 균열 및 파괴거동

대표적으로, S3 시리즈 휨 부재의 균열현황을 Fig. 7에 나타내었다.

그림에 나타난 네 개 부재의 철근비는 1.14%로 동일하고 순환 굽은골재의 치환률이 각 0, 30, 50 및 100%인 부재이다.

천연굽은골재 보와 순환굽은골재 보의 휨균열 형상은 거의 유사하다. 그러나 순환굽은골재 보의 균열개수가 천연굽은골재 보의 균열개수보다 더 많게 나타난다. 구체적으로 Fig. 7의 S3 시리즈 보의 순환굽은골재의 치환률이 0, 30, 50 및 100%일 때의 균열개수는 각각 10, 11, 12, 13개이다. 즉, 실험결과는 순환굽은골재 보의 균열 평균간격이 천연굽은골재 보(R000-S3)의 균열 평균간격보다 작은 것을 나타낸다.

실험 부재의 순환골재 치환률(S3 시리즈 보)에 따른 하중-균열폭 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 초기균열단계까지 순환굽은골재 보의 균열폭과 천연굽은골재 보의 균열폭은 유사하

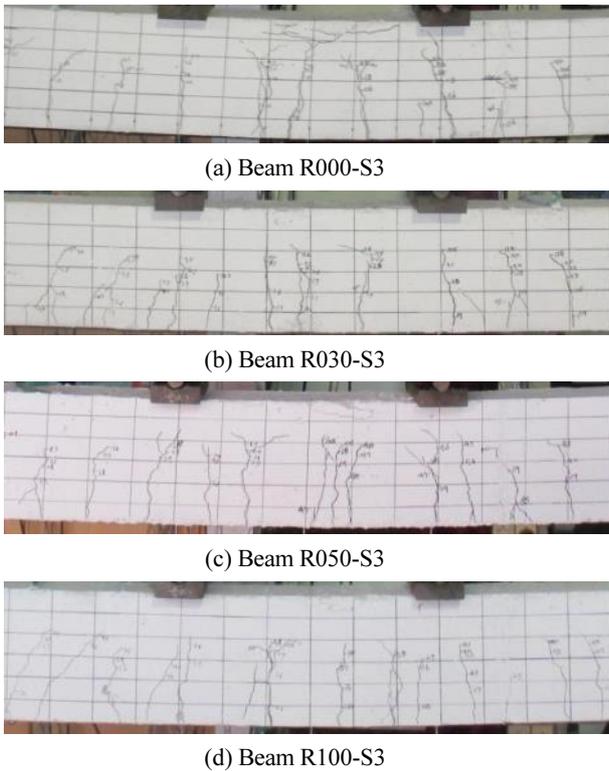


Fig. 7 Typical crack failure patterns(S3 series beam)

다. 또한, 초기균열 이후의 단계에서도 순환골재 치환률에 따른 순환골재 보의 균열폭은 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 본 실험에서는 1.14% 이하의 낮은 철근비를 대상으로 하였으며, 더 큰 철근비에 대한 추가 연구가 필요한 부분이라고 판단된다.

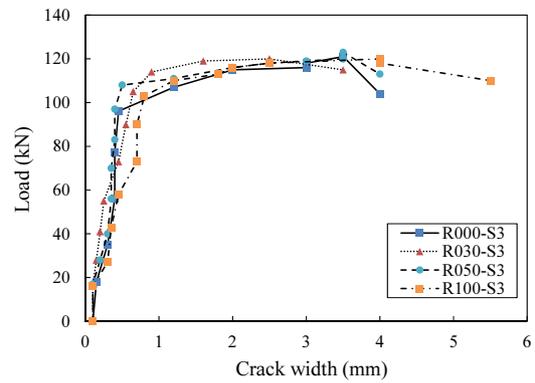


Fig. 8 Load-crack width relationship(S3 series beams)

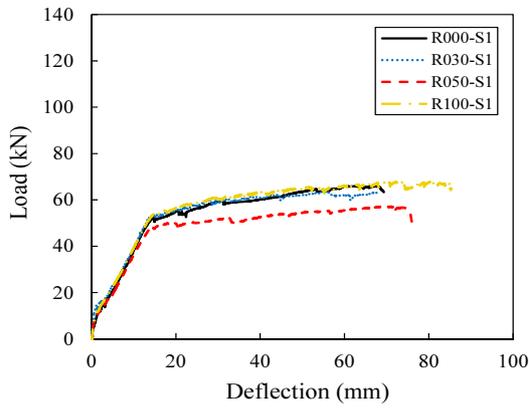
### 3.3 하중-처짐 곡선

Table 4에 초기균열하중, 항복하중 및 극한하중과 이에 대응하는 처짐값을 나타내었다. 초기균열하중은 하중-처짐 곡선의 초기 선형구간 종점에서의 하중이고, 극한하중은 하중-처짐곡선의 최대하중으로 산정하였다. Fig. 9에 순환골재 치환률에 따른 하중-처짐곡선을 나타내었다. 각 그림은 철근량이 동일한 상태에서 순환골재 치환률에 따른 하중-처짐곡선을 나타낸다. 철근비가 0.50%(S1 시리즈)와 0.79%(S2 시리즈)인 보의 경우, 순환골재치환률은 극한하중에 영향을 미치고 있다.

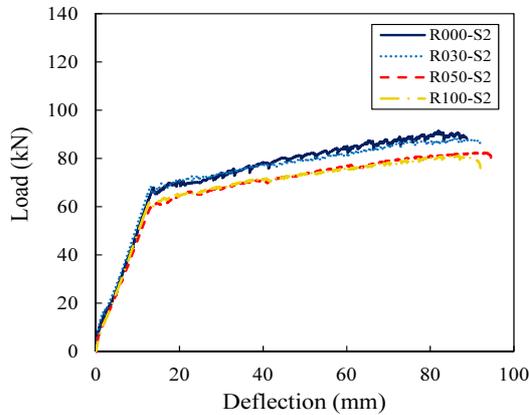
R000-S2, R030-S2, R050-S2 및 R100-S2 보의 극한하중은 각각 91.5, 88.3, 82.2 및 81.0 kN이고, 이는 순환골재 치환률의 증가에 따라 극한하중이 감소하는 것을 나타낸다. 철근비가 1.14%(S3 시리즈)인 보의 경우, 순환골재 치환률에 따른 극한하중의 차이는 뚜렷하지 않다. S3 시리즈 보의 철근비는 S1과

Table 4. Experimental values of the test beams

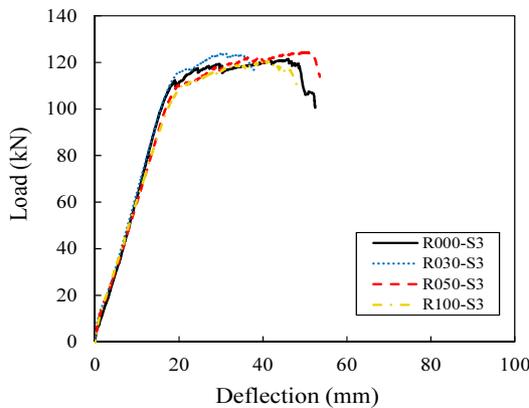
Beam specimen	Initial cracking		Yield state		Ultimate state		Ductility Index
	$P_{cr}$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
R000-S1	13.4	1.90	52.5	14.9	66.3	90.3	4.7
R000-S2	13.0	1.50	68.0	13.8	91.5	96.8	6.4
R000-S3	7.2	0.80	112.4	19.0	121.5	46.0	2.4
R030-S1	14.7	1.10	53.9	14.5	65.2	86.3	4.7
R030-S2	16.1	1.84	68.5	13.1	88.3	92.2	7.0
R030-S3	15.3	1.63	115.9	20.0	123.7	34.9	1.7
R050-S1	10.0	1.12	48.7	14.5	57.1	70.9	4.9
R050-S2	8.9	1.13	61.6	14.7	82.2	93.5	6.3
R050-S3	11.9	1.18	110.2	19.8	124.3	50.3	2.5
R100-S1	11.9	1.39	54.7	15.2	67.9	73.3	4.8
R100-S2	5.0	0.60	61.9	12.9	81.0	84.7	6.6
R100-S3	5.9	0.50	110.9	21.5	120.4	41.2	1.9



(a) Beams with a rebar ratio of 0.50%(S1 series beam)



(b) Beams with a rebar ratio of 0.79%(S2 series beam)

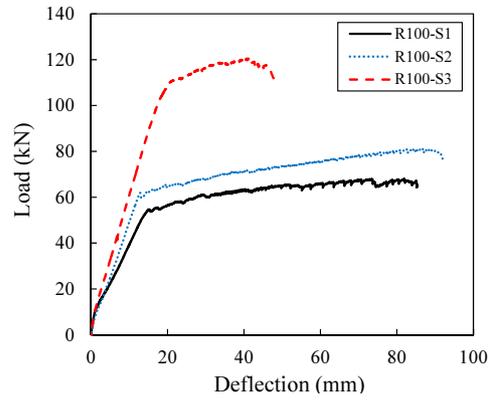


(c) Beams with a rebar ratio of 1.14% (S3 series beam)

**Fig. 9** Effect of RCA replacement ratio on load-deflection curves

S2 시리즈 보의 철근비 보다 크다. 따라서, S1과 S2 시리즈 보의 휨강도에 비해 S3 시리즈 보의 휨강도는 콘크리트보다 철근량에 영향을 받아 순환골재 치환률에 따른 콘크리트 강도에 영향을 덜 받은 것으로 판단된다.

순환골재 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선의 기울기는 천연골재 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선의 기울기보다 작다. 이는 순환골재 치환률이 콘크리트 보의 휨강성에 영향을 미친 것



**Fig. 10** Effect of rebar ratio on load-deflection curve (R100 series beams)

을 나타내며, 이는 순환골재 콘크리트의 탄성계수가 천연골재 콘크리트의 탄성계수보다 작기 때문이다. 순환골재 콘크리트의 부착강도는 일반골재의 부착강도보다 작으며, 이는 일반골재에 비해 순환골재와 모르타르 계면의 부착강도가 작기 때문이다(Butler et al. 2011).

철근비에 따른 하중-처짐 곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 예측한 대로 철근비 증가에 따라 휨강도는 증가한다. 철근비 증가에 따라 초기균열 후의 휨강성은 증가한다.

### 3.4 연성지수

콘크리트 구조물이 탄성영역을 넘어 소성영역의 파괴에 도달할 때까지의 변형 능력을 연성지수로 표현한다. 콘크리트 구조물의 연성지수는 구조물의 처짐, 회전각 또는 곡률 등의 변형특성을 사용하여 정량화 할 수 있다. 이 실험연구에서는 부재의 중앙단면의 처짐을 측정하였으며, 식 (1)과 같이 콘크리트 부재의 항복상태와 극한상태의 처짐을 이용하여 연성지수를 계산하였다.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

여기서,  $\mu$  : 부재의 연성지수

$\Delta_u$  : 부재의 극한하중에서의 처짐

$\Delta_y$  : 부재의 항복하중에서의 처짐

연성지수 계산결과를 Table 4에 나타내었다. 철근비가 0.50%이고 순환골재 치환률이 다른 네 개의 보(S1 시리즈)의 연성지수는 4.7~4.9를 나타낸다. 또한 철근비가 0.79%인 네 개의 보(S2 시리즈)와 철근비가 1.14%인 네 개의 보(S3 시리즈)의 연성지수는 각각 6.3~7.0과 1.7~2.5의 값을 나타낸다.

순환골재 치환률에 따른 S1시리즈 보의 연성지수는 거의

비슷한 값을 나타낸다. 또한, S2시리즈와 S3시리즈 보의 연성 지수도 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 따라서 실험결과는 순환골재 치환률에 따른 연성지수의 뚜렷한 변화가 없는 것을 나타낸다.

#### 4. 휨강도 평가

강도설계법에 기반한 콘크리트구조기준(KCI, 2012)과 한계상태설계법에 기반한 도로교설계기준(MOLIT, 2012)에 일 반콘크리트 보의 휨강도 설계식은 규정되어 있는 반면, 순환 골재 콘크리트 보의 휨 강도 평가식은 규정되어 있지 않다. 본 연구에서는 순환골재 콘크리트 보의 실험에서의 휨강도 측정 값과 현행 설계식을 이용하여 계산한 예측값의 비교를 통하여 순환골재 콘크리트 보의 휨성능을 평가하고 이의 적용가능성에 대해 고찰하고자 하였다.

콘크리트구조기준(KCI, 2012)에 따라 부재의 휨 강도 산정 방법은 다음과 같다.

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (3)$$

여기서,  $A_s$ 는 철근의 단면적,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $d$ 는 유효깊이,  $a$ 는 등가압축응력블록 깊이,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도,  $b$ 는 보의 단면폭이다. 콘크리트 압축강도와 철근의 항복 강도는 재료실험의 측정결과를 적용하였다.

도로교설계기준(MOLIT, 2012)에서는 부재 단면의 압축응력과 변형률관계를 특정한 응력-변형률 곡선으로 나타내어 단면 압축영역의 응력분포를 표현한다. 도로교설계기준에서는 응력-변형률 관계를 세 가지로 구분하여 제시하고 있다. 비선형 해석을 위한 응력-변형률 관계, 단면설계를 위한 p-r곡선의 응력-변형률 관계 및 등가사각응력블록을 이용하는 방법으로 구분하고 있다.

단면에 작용하는 압축력(C)과 인장력(T)은 다음과 같다.

$$C = \eta f_{cd} a b \quad (4)$$

$$f_{cd} = \phi_c (\alpha_{cc} f_{ck}) \quad (5)$$

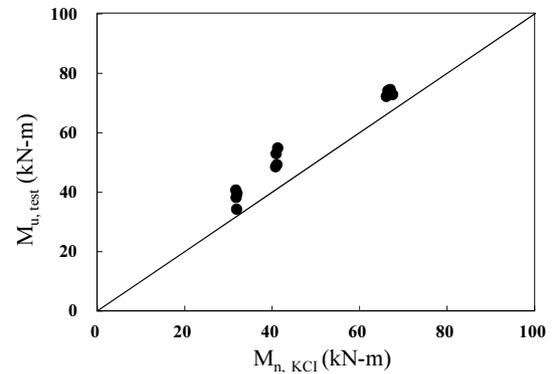
$$T = A_s f_{yd} \quad (6)$$

$$f_{yd} = \phi_s f_y \quad (7)$$

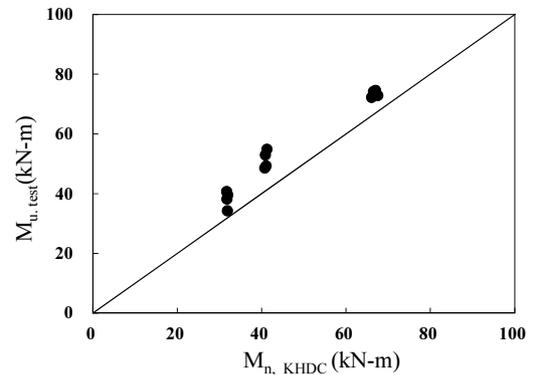
힘의 평형관계에 의해  $C = T$ 이므로,

$$a = \frac{A_s f_{yd}}{\eta f_{cd} b} \quad (8)$$

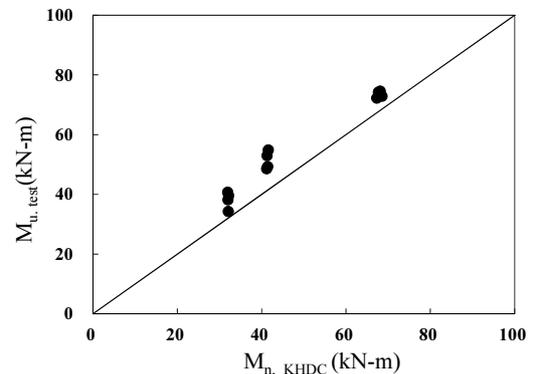
$$z = d - \frac{a}{2} \quad (9)$$



(a) KCI (2012)



(b) HBDS(2012) ( $\alpha_{cc} = 0.85$ )



(c) HBDS (2012) ( $\alpha_{cc} = 1.00$ )

Fig. 11 Comparison of flexural strengths

**Table 5** Experimental and prediction results

Beam specimen	Flexural strength (kN-m)				Ratio		
	Test results $M_{Test}(1)$	KCI*(2012) $M_{KCI}(2)$	HBDS** (2012)		KCI*	HBDS**	
			$M_{HBDS(0.85)}$ $\alpha_{cc} = 0.85(3)$	$M_{HBDS(1.00)}$ $\alpha_{cc} = 1.00(4)$	$\frac{M_{Test}}{M_{KCI}}$ (1)/(2)	$\frac{M_{Test}}{M_{HBDS(0.85)}}$ (1)/(3)	$\frac{M_{Test}}{M_{HBDS(1.00)}}$ (1)/(4)
R000-S1	39.62	31.97	31.97	32.17	1.24	1.24	1.23
R000-S2	54.90	41.24	41.24	41.58	1.33	1.33	1.32
R000-S3	72.87	67.53	67.53	68.54	1.08	1.08	1.06
R030-S1	38.21	31.77	31.77	32.00	1.21	1.20	1.19
R030-S2	52.98	40.89	40.89	41.28	1.30	1.30	1.28
R030-S3	74.21	66.49	66.49	67.66	1.12	1.12	1.10
R050-S1	34.28	31.87	31.87	32.08	1.08	1.08	1.07
R050-S2	49.31	41.07	41.07	41.44	1.20	1.20	1.19
R050-S3	74.59	67.02	67.02	68.11	1.11	1.11	1.10
R100-S1	40.72	31.68	31.68	31.92	1.29	1.29	1.28
R100-S2	48.59	40.74	40.74	41.16	1.19	1.19	1.18
R100-S3	72.26	66.07	66.07	67.30	1.09	1.09	1.07
Mean					1.19	1.19	1.17

\* : Specifications for Structural Concrete from Korea Concrete Institute(2012)

\*\* : Highway Bridge Design Specifications-Limit State Design from Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2012)

$$M_n = Tz \quad (10)$$

여기서,  $f_{yd}$ 는 철근의 설계항복강도,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $f_{cd}$ 는 콘크리트의 설계압축강도,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도,  $\phi_c$ 는 콘크리트 재료계수이고  $\phi_s$ 는 철근의 재료계수이다. 또한  $\alpha_{cc}$ 는 압축강도에 대한 장기효과와 하중재하방법을 고려하는 계수로서, 통상 설계시에 0.85를 적용하나, 단기하중작용시에 1.0을 적용할 수 있다. 실험 부재의 공칭 휨강도를 계산하기 위해  $\phi_c$ 와  $\phi_s$ 는 1.0을 적용하였으며,  $f_{ck}$ 와  $f_y$ 는 재료실험 측정결과를 사용하였다.

콘크리트구조기준과 도로교설계기준을 이용하여 계산한 부재의 공칭휨강도를 Table 5와 Fig. 11에 나타내었다.

콘크리트구조기준에 의한 예측값에 대한 측정값의 비는 1.08~1.33이고 비의 평균값은 1.19이다. 도로교설계기준을 이용하여 공칭 휨강도를 계산할 때,  $\alpha_{cc}$ 는 0.85와 1.0을 각각 적용하였다.  $\alpha_{cc}$ 는 0.85일 때 도로교설계기준 예측값에 대한 측정값의 비는 1.08~1.33이고 비의 평균값은 1.19이다. 이때, 콘크리트구조기준에 의한 휨강도 예측값과 도로교설계기준에 의한 휨강도 예측값은 동일하다. 이는 콘크리트 압축강도에 대한 하중작용기간 및 재하방법을 고려하는 계수가 0.85로서 동일하기 때문이다.

또한,  $\alpha_{cc}$ 는 1.0일 때 도로교설계기준 예측값에 대한 측정값

의 비는 1.06~1.32이고 비의 평균값은 1.17이다.  $\alpha_{cc}$ 가 0.85에 비해  $\alpha_{cc}$ 가 1.0일 때 휨강도의 예측값에 대한 측정값의 비는 감소한다.

콘크리트구조기준과 도로교설계기준에 의한 공칭 휨강도 예측값은 실험부재의 휨강도 측정값 보다 작다. 따라서 현행 설계기준에 의한 순환골재 콘크리트 보의 휨강도 예측결과는 실제의 휨강도를 과소평가한다. 현행 콘크리트구조기준과 도로교설계기준에서의 휨 설계시 콘크리트 압축응력블록은 등가응력블록을 사용하는 개념에 바탕을 두고 있다. 추후 순환골재콘크리트의 응력-변형률 관계 곡선의 특성을 실제적으로 반영한 등가사각 응력블록을 활용한 휨설계기법의 개발이 필요하다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 압축강도 31~38 MPa 범주의 순환골재콘크리트 보의 휨강도 특성을 파악하기 위한 실험연구를 수행하였으며, 주요결론은 다음과 같다.

- 1) 천연굵은골재 보와 순환굵은골재 보의 휨균열 형상은 거의 유사하며, 전반적으로 순환굵은골재 보의 균열간격이

- 천연굵은골재 보의 균열간격보다 작다.
- 2) 순환골재 치환률에 따른 하중-균열폭 관계의 측정결과는 초기균열단계까지 순환굵은골재 보의 균열폭과 천연굵은골재 보의 균열폭은 유사하다. 또한, 초기균열 이후의 단계에서도 순환골재 치환률에 따른 순환굵은골재 보의 균열폭은 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다.
  - 3) 순환골재 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선의 기울기는 천연골재 콘크리트 보의 하중-처짐 곡선의 기울기보다 작으며, 이는 순환골재 치환률이 콘크리트 보의 휨강성에 영향을 미친 것을 나타낸다. 순환골재 콘크리트 보의 휨강성의 감소는 순환골재 콘크리트의 탄성계수가 천연골재 콘크리트의 탄성계수보다 작기 때문으로 판단된다.
  - 4) 철근비가 0.50%이고 순환골재 치환률이 다른 네 개의 보(S1 시리즈)의 연성지수는 4.7~4.9를 나타낸다. 또한 철근비가 0.79%인 네 개의 보(S2 시리즈)와 철근비가 1.14%인 네 개의 보(S3 시리즈)의 연성지수도 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 따라서 실험결과는 순환골재 치환률에 따른 연성지수의 뚜렷한 변화가 없는 것을 나타낸다.
  - 5) 강도설계법에 토대를 둔 콘크리트구조기준과 한계상태설계법에 토대를 둔 도로교설계기준에 의한 공칭 휨강도 예측값은 실험부재의 휨강도 측정값 보다 작다. 따라서, 현행 설계기준에 의한 순환골재 콘크리트 보의 휨강도 예측결과는 실제의 휨강도를 과소평가하여 보수적인 설계를 제공하는 것으로 나타난다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 환경선진화기술개발사업(과제번호: 2014000150003)에서 지원받았습니다.

## References

- Ajdkiewicz, A. B., and Kliszczewicz, A. T. (2007), Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(2), 259-273.
- Arezoumandi, M., Smith, A., Volz, J. S., and Khayat, K. H. (2015), An Experimental Study on Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams with 100% Recycled Concrete Aggregate, *Engineering Structures*, 154-162.
- Bai, W., and Sun, B. (2010), Experimental Study on Flexural Behavior of Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam, *Applied Mechanics and Materials*, 29-32, 543-548.
- Butler, L., West, J. S., and Patil, N. (2011), The Effect of Recycled Concrete Aggregate Properties on the Bond Strength between RCA Concrete and Steel Reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 41, 1037-1049.
- Choi, H. B., Shin, Y. S., An, S. H., Chung, H. S., and Kang, K. I. (2007), A Properties and Durability of Recycled Aggregate Concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 23(9), 125-132.
- Jang, J. Y., Jin, J. H., Cho, G. T., Nam, Y. K., and Jeon, C. K. (2003), Strength Characteristics of Recycled Concrete by Recycled Aggregate in Incheon Area Waste Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(2), 197-208.
- Kang, Thomas H. -K., Kim, W., Kwak, Y. K., and Hong, S. G. (2014), Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates, *ACI Structural Journal*, 111(3), 607-616.
- Kim, K. W., Li, X. F., Choi, Y. K., Cho, H. W., and Jung, K. D. (1996), Variation of strength characteristics of recycled concrete due to different recycled aggregate contents, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 32-36.
- Kim, M. H., Lee, B. H., Kim, J. M., and Lee, S. S. (1993), A Fundamental Study on the Applicability of Construction of Recycled Aggregate Concrete(I), *Journal of the Korea Concrete Institute*, 9(8), 201-211.
- Kim, S. W., Han, D. S., Lee, H. A., Ko, M. Y., and Kim, K. H. (2012), Evaluation of Structural Performance of Reinforced concrete Beams According to Water Absorption of Recycled Coarse Aggregate, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(5), 49-58.
- Kim, S. W., Na, D. S., Lee, D. W., and Kim, B. K. (1996), An Experimental Study on the Strength Properties of the Recycling Aggregate Concrete by Curing Condition, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 24-30.
- Kim, W. S., Yeo, J. D., Kwak, Y. K., Kang, Thomas, H.-K., and Hong, S. G. (2012), A Study on the Flexural Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams Using Recycled Aggregates, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 28(3), 23-30.
- Korea Concrete Institute(KCI) (2012), Specifications for Structural Concrete, Korea Concrete Institute.
- KS F 2503(2007), Testing Method for Density and Absorption of Coarse Aggregate, Korea Agency for Technology and Standards.
- KS F 2504 (2007), Testing Method for Density and Absorption of Fine Aggregate, Korea Agency for Technology and Standards.
- KS F 2573 (2011), Recycled Aggregate for Concrete, Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, Y. T., Hong, S. U., Kim, S. H., Beak, S. K., and Cho, Y. S. (2014), Flexural Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams by Replacement Ratios of Recycled Coarse Aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(1), 1-9.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) (2012), Korea Highway Bridge Design Specifications - Limit State Design, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Sato, R., Maruyama, I., Sogabe, T., and Sogo, M. (2007), Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 43-61.
- Song, S. H., Choi, K. S., You, Y. C., Kim, K. H., and Yun, H. D. (2009), Flexural Behavior of Reinforced Aggregate Concrete Beams, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(4), 431-439.
- Yang, I. H., and Kim K. C. (2016), Mechanical Properties and

---

**요 지 :** 이 연구에서는 순환굵은골재를 사용하여 31 ~ 38 MPa 범주의 압축강도를 갖는 콘크리트의 보의 휨강도 실험연구를 수행하였다. 천연굵은골재에 대한 순환굵은골재의 치환률과 철근비를 실험변수로 고려하였다. 순환굵은골재의 치환률로써 0, 30, 50 및 100%를 고려하였으며, 주철근의 철근비로써 0.50, 0.79 및 1.14%를 고려하였다. 4점 하중재하 시험방법을 통하여 순환골재 콘크리트 보의 균열 및 파괴거동, 하중-처짐 관계 특성을 파악하였다. 천연굵은골재 보와 순환굵은골재 보의 휨균열 형상은 거의 유사하며, 전반적으로 순환굵은골재 보의 균열간격이 천연굵은골재 보의 균열간격보다 작다. 순환골재치환률에 따른 균열폭 크기는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 또한, 설계기준에 의한 예측식을 이용하여 실험 부재의 휨강도를 산정하였다. 현행 설계기준에 의한 순환골재 콘크리트 보의 휨강도 예측결과는 실제의 휨강도를 과소평가하여 보수적인 설계를 제공하는 것으로 나타난다.

**핵심용어 :** 순환굵은골재, 골재치환률, 철근비, 균열, 휨강도

---