

## 순환골은골재를 포함하는 콘크리트의 역학적 특성 및 강도 예측

양인환<sup>1</sup>, 김경철<sup>2\*</sup>

# Mechanical Properties and Predictions of Strength of Concrete Containing Recycled Coarse Aggregates

In-Hwan Yang<sup>1</sup>, Kyoung-Chul Kim<sup>2\*</sup>

**Abstract:** According to KS and Standard Specifications for Concrete, the compressive strength of concrete containing recycled aggregate is limited to 27 MPa and thereafter there are little research on concrete containing recycled aggregate of its compressive strength of greater than 27 MPa. Therefore, to expand the applicability of concrete recycled coarse aggregate(RCA), this paper concerns the mechanical properties of concrete containing RCA with compressive strength ranging from 30 to 60 MPa. The experimental parameters were water-cement ratio and replacement ratio of RCA. Water-cement ratio( $w/c$ ) was 0.36, 0.46 and 0.53, and replacement ratio of RCA was 30, 50, 70 and 100%. The experimental results were discussed about compressive strength, elastic modulus, split tensile strength and modulus of rupture. Test results of elastic modulus were compared to the design code predictions. Experimental elastic modulus for concrete with  $w/c=0.53$  decreased by greater than 10% compared with that for concrete with  $w/c=0.36$ . The design code predictions for elastic modulus overestimated the experimental results. Whereas, the design code predictions for modulus of rupture underestimated the measured values.

**Keywords:** Recycled coarse aggregate, Water-cement ratio, Replacement ratio, Mechanical properties, Modulus of rupture

## 1. 서 론

강모래와 강자갈의 고갈로 인해 현재 콘크리트 제조를 위한 대부분의 골재는 석산으로부터 채취하고 있는 상황이나, 건설용 골재 생산을 위한 석산 개발은 주위의 환경과 밀접한 연관성이 있어 제한을 받고 있다. 또한, 우리나라는 과거 1970~80년대부터 급격한 산업발전과 경제성장으로 인해 콘크리트 구조물의 건설이 급격하게 증가하였으며, 이때부터 건설된 콘크리트 구조물은 노후화되어 폐기과정에서 발생하는 건설폐기물의 비율이 점차 증가하고 있다. 이러한 건설폐기물의 증가는 최종 매립장의 증설 부담을 가중시키는 원인으로 작용하고 있으며, 기존 매립지는 포화상태가 되어 신규 매립지를 부설하기 위해서는 매립지 선정에 있어 사회적인 문제가 발생하는 상황까지 도달하였다(Kim et al., 2013; Kim et al., 1996; Choi et al., 2007). 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로서 건설폐기물에서 생산한 순환골재의 재활용 확대가

바람직하며, 이에 대한 다양한 연구가 필요한 상황이다(Lee et al., 2009; Jang et al., 2003; Shim, 2010; Kim et al., 2011; Kim et al., 2013; Lee et al., 2014).

Evangelista et al.(2007)과 Cabral et al.(2010)은 순환골재를 이용한 콘크리트의 기본 물성을 연구하였으며, Corinaldesi (2010), Huda and Alam(2014), Yang and Jeong(2016) 및 Rahal(2007)은 곱은순환골재를 사용한 콘크리트의 기본 물성을 연구하였다. Younis and Pilakoutas(2013), Xiao and Zhang (2005) 및 Belen et al.(2011)은 순환골재 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 모델링하고자 하였다. 또한, Gayarre et al.(2014)은 양생조건이 순환골재 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 연구하였다.

그러나, 아직까지 국내에서는 순환골재에 대한 긍정적인 인식의 부족과 심도 있는 연구결과와 연계로서 도로용, 성토 및 복토 등의 비구조용 콘크리트에 순환골재의 사용이 많은 부분을 차지하고 있다. 또한 콘크리트표준시방서(KCI, 2009)와 KS F 2573(2011)에서는 27 MPa 이하의 설계압축강도 조건에서 구조용 콘크리트의 순환골재 함유량을 총용적량의 30% 이하로 제한하고 있는 실정이다.

Jang et al.(2003)은 압축강도 25 MPa 이하의 순환골재 콘크리트의 강도 특성에 대한 연구를 수행하였으며, Choi et al.

<sup>1</sup>정회원, 군산대학교 토목공학과 정교수

<sup>2</sup>정회원, 군산대학교 토목공학과 박사과정, 교신저자

\*Corresponding author: popping6069@naver.com

•본 논문에 대한 토의를 2016년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 5월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(2011)은 순환골재 내부의 미세균열 발생형태 및 흡수특성에 대해 분석하였다. Chung et al.(2006)은 압축강도 43 MPa 이하의 순환골재 콘크리트의 전단 및 부착강도 특성을 연구하였다. Song et al.(2009)은 순환골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 특성을 분석하였으며, Lee et al.(2005)은 고로슬래그를 사용한 순환골재콘크리트의 강도 특성을 연구하였다. 또한, Jeon et al.(2009)은 부순골재와 순환골재를 혼합한 골재를 사용한 콘크리트의 물성을 평가한 바 있다. 이와 같이 대다수의 기존연구(Kim et al., 1996; Sim et al., 2006; Choi et al., 2005; Kim et al., 1993; Lee et al., 2005)는 콘크리트표준시방서(KCI, 2009)를 만족시키는 고품질의 순환골재를 사용한 압축강도 40 MPa 이하의 콘크리트 재료 특성에 대한 연구가 주로 수행되었다. 반면에, 순환골재를 사용한 압축강도 40 MPa 이상의 콘크리트의 역학적 특성에 대한 연구는 미비하며, 이에 따라 순환골재의 사용 확대를 위해 압축강도 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 굵은순환골재를 사용하는 콘크리트의 사용 범위를 확대하기 위해 압축강도 30~65 MPa 수준의 굵은순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 파괴계수 등의 기본적인 역학적 특성을 평가하기 위한 실험연구를 수행하였다. 또한, 기존 코드에서의 탄성계수 및 파괴계수 예측결과를 실험결과와 비교분석하였다. 이 연구의 실험결과는 현행 콘크리트표준시방서에서 제한하고 있는 순환골재 용적 사용량을 초과하는 순환골재 콘크리트의 성능 평가와 구조물 적용을 위한 유용한 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 순환골재 콘크리트 배합

### 2.1 사용재료

시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 천연굵은골재는 부순자갈로써 최대직경 25 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였고, 순환굵은골재는 최대직경 20 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였다. 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 실험에 사용된 골재의 밀도 및 흡수율 실험결과를 나타내었다. 이 실험에서는 굵은골재를 순환굵은골재로 각각 30, 50, 70 및 100%로 치환하여 물성을 평가하였으며, 굵은순환골재(RCA, recycled coarse aggregate) 치환율에 따른 입도분포곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 순환골재 치환율



Fig. 1 Aggregates used in concrete mixtures

Table 1 Properties of aggregate

Aggregate	Properties	
	Density g/cm <sup>3</sup>	Water absorption %
Natural coarse aggregate	2.62	0.58
Recycled coarse aggregate	2.42	3.87
Mixed fine aggregate	2.59	1.02

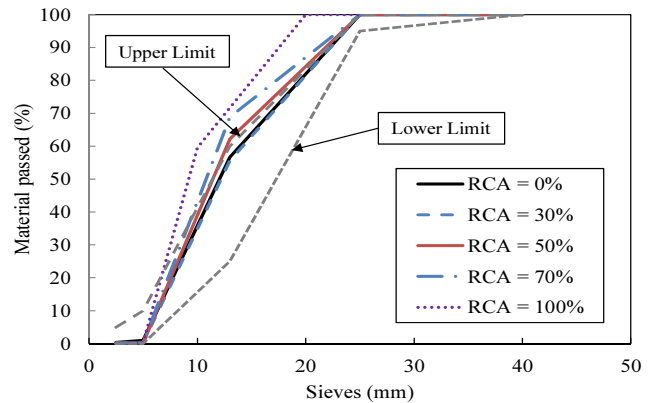


Fig. 2 Grading curves for coarse aggregate

이 30%인 굵은골재의 입도분포는 KS기준의 범위 이내에 분포하고, 순환골재 치환율이 50%인 굵은골재의 입도분포는 KS기준의 상한값에 근접한다. 반면에, 순환골재 치환율이 70 및 100%인 굵은골재의 입도분포는 KS기준의 범위의 상한값을 벗어난다.

이 연구에서는 콘크리트의 역학적 특성을 파악하는데 주안점을 두었으며, 이에 따라 골재의 밀도, 흡수율 및 입도분포를 파악하였다. 한편, 순환골재의 알칼리 골재반응, 유해물질 함유량 등은 순환골재 콘크리트의 물성 특히, 내구성능에 영향을 미치므로 추후 연구에서 이에 대한 평가가 필요하다고 판단된다.

**Table 2** Mix proportions

Mixtures	Unit content(kg/m <sup>3</sup> )									
	w/c	S/a (%)	Water	Cement	Fine aggregate		Coarse aggregate			
					Crushed	Sea-sand	Natural	Recycled	Replacement (%)	
A0								936	0	0
A30								655	259	30
A50	0.53	48.3	176	332	612	262	468	432	50	
A70							281	605	70	
A100							0	865	100	
B0								942	0	0
B30								659	261	30
B50	0.46	47.1	173	376	587	252	471	435	50	
B70							283	609	70	
B100							0	870	100	
C0								920	0	0
C30								644	255	30
C50	0.36	46.0	175	486	549	235	460	425	50	
C70							276	595	70	
C100							0	850	100	

**2.2 배합**

Table 2에 배합설계를 나타내었다. 배합 설계 시에 물-시멘트 비와 굵은순환골재 치환율을 실험변수로 고려하였다. 실험변수로써 고려된 물-시멘트 비는 0.36, 0.46 및 0.53이고, 기본배합을 기준으로 굵은골재를 30, 50, 70 및 100%의 순환굵은골재로 용적치환을 하였다. 골재의 표면상태는 표면건조내부포화상태(saturated surface-dried)로 배합에 사용하였다. 또한, 고성능유동화제(super-plasticizer)를 시멘트 중량 비 1.0%를 혼합하였다.

타설 후 시편을 2일 동안 기건양생한 후에 몰드를 탈형하고 수조에서 20±3°C의 온도 조건에서 재령 28일까지 양생을 수행하였다.

Table 3에 슬럼프와 공기량 측정값을 나타내었다. A100 배합의 슬럼프는 A0 배합의 슬럼프보다 8 mm 증가하였고, B100 배합의 슬럼프는 B0 배합의 슬럼프보다 10 mm 증가하였다. 또한, C100 배합의 슬럼프는 C0 배합의 슬럼프보다 4 mm 증가하였다. 천연골재는 부순자갈로써 골재의 모양이 각진 형태를 나타내는 반면에, 순환골재는 순환골재 처리과정에서 파쇄 및 마쇄 과정 등을 통해 부순자갈에 비해 상대적으로 둥근 모양을 나타낸다. 이러한 골재 형상에 의해 순환골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프가 일반골재 콘크리트의 슬럼프보다 다소 크게 측정된 걸로 판단된다. A, B 및 C 시리즈 배합의 공기량은 각각 4.9~5.4%, 4.5~4.9 및 4.7~5.1%의 범위으로써,

각 치환률로 순환골재 치환에 따른 공기량 변동 범위는 뚜렷하지 않다.

물-시멘트 비 및 순환굵은골재 치환율에 따른 각 배합별로 실험시편을 3개씩 제작하여 콘크리트의 재령 7일 압축강도, 재령 28일 압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도 및 파괴계수를 측정하였다.

**3. 실험결과 및 분석**

**3.1 압축강도**

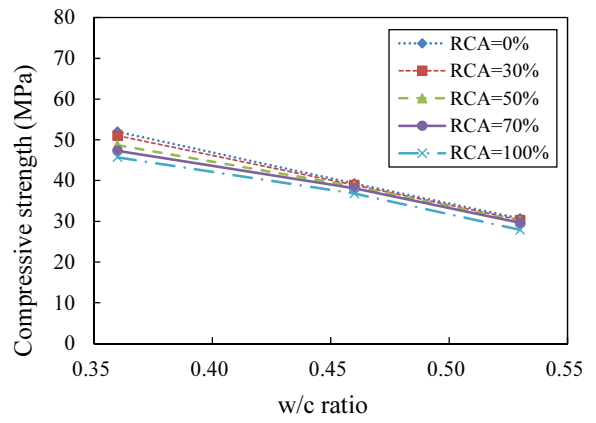
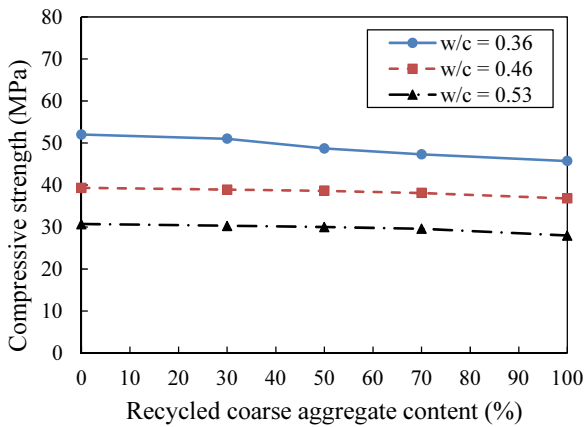
Table 3에 7일 압축강도와 28일 압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도 및 파괴계수 측정결과를 나타내었다. 각 배합의 측정항목마다 3개 시편의 실험결과 평균값을 나타내었다.

압축강도실험은 직경 100 mm이고 높이가 200 mm인 실린더 공시체를 이용하여 측정하였으며, Fig. 3과 Fig. 4에 7일 압축강도 측정결과와 28일 압축강도 측정결과를 나타내었다.

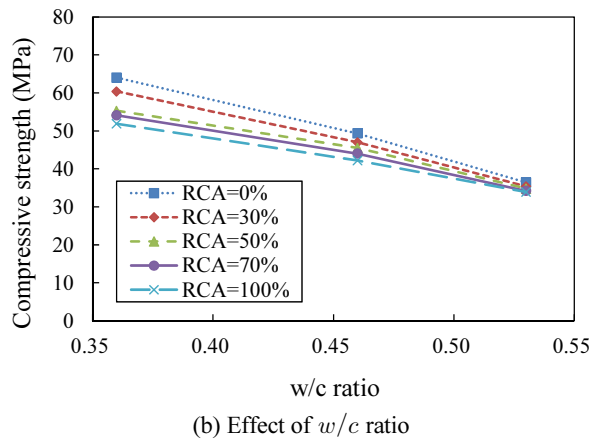
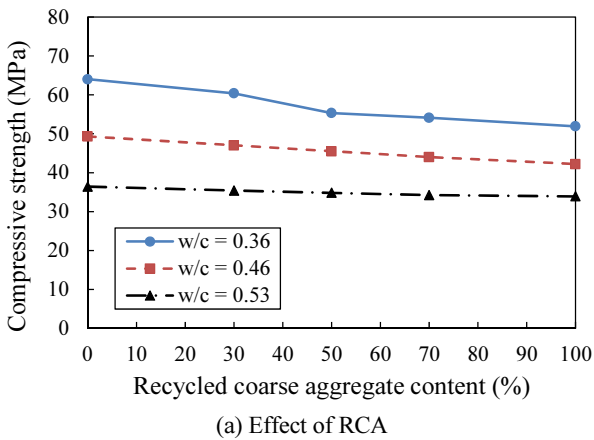
굵은순환골재의 치환율에 따른 7일 압축강도 실험결과를 Fig 3(a)에 나타내었다. A시리즈(w/c=0.53)의 경우, 기본 배합(치환율=0%)의 7일 압축강도는 30.7 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 7일 압축강도는 각각 30.3, 30.0, 29.6 및 27.9 MPa이다. B시리즈(w/c=0.46)의 경우, 기본 배합의 7일 압축강도는 39.3 MPa이고, 순환골재 치환율이 30,

**Table 3** Test results

Mixtures	Slump (mm)	Air content (%)	Compressive strength(MPa)		Elastic modulus (MPa)	Split tensile strength(MPa)	Modulus of rupture(MPa)
			7 days	28 days			
A0	115	5.0	30.7	36.4	23,841	3.6	5.5
A30	124	5.4	30.3	35.4	23,694	3.5	5.3
A50	119	5.1	30.0	34.8	22,858	3.4	5.1
A70	131	4.9	29.6	34.2	21,458	3.3	5.0
A100	128	5.4	27.9	33.9	21,411	3.2	4.7
B0	115	4.4	39.3	49.3	26,833	4.0	6.6
B30	124	4.6	38.9	47.0	25,343	3.9	6.5
B50	120	4.8	38.6	45.5	24,202	3.7	6.4
B70	116	4.5	38.1	44.0	24,008	3.5	6.2
B100	125	4.9	36.8	42.2	23,508	3.3	5.9
C0	113	4.7	52.0	64.0	27,374	4.7	7.0
C30	105	4.8	51.0	60.4	25,929	4.6	6.9
C50	123	5.2	48.7	55.3	25,795	4.4	6.6
C70	118	4.9	47.3	54.1	25,745	4.2	6.4
C100	117	5.1	45.7	51.9	24,601	3.9	6.1



**Fig. 3** Comparison of 7-day compressive strength



**Fig. 4** Comparison of 28-day compressive strength

50, 70 및 100%일 때 7일 압축강도는 각각 38.9, 38.6, 38.1 및 36.8 MPa이다. 또한 C시리즈( $w/c=0.36$ )의 경우, 기본 배합의 7일 압축강도는 52.0 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 7일 압축강도는 각각 51.0, 48.7, 47.3 및 45.7 MPa이다. 이러한 실험결과는 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트 7일 압축강도가 감소하는 것을 나타낸다. 치환율이 50%일 때까지 7일 압축강도 감소율은 미미하다. 물-시멘트 비가 0.53, 0.46 및 0.36일 때, 각 기본배합의 7일 압축강도에 대해 순환골재 치환율이 100%일 때의 7일 압축강도는 각각 9.1, 6.4 및 12.1% 감소하였다.

물-시멘트 비( $w/c$ )에 따른 7일 압축강도 실험결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다.  $w/c=0.36$ 일 때의 7일 압축강도에 비해  $w/c=0.46$ 일 때의 7일 압축강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 23.7, 20.7, 19.5 및 19.6% 감소하였다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 7일 압축강도에 비해  $w/c=0.53$ 일 때의 7일 압축강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 40.6, 38.4, 37.4 및 38.9% 감소하였다.

실험결과는 물-시멘트 비의 증가에 따른 7일 압축강도 감소율은 순환골재 치환율이 30%일 때 23.7 및 40.6%로서 가장 크게 감소하는 것을 나타낸다.

굵은순환골재의 치환율에 따른 28일 압축강도 실험결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 굵은순환골재의 치환율이 증가할수록 28일 압축강도가 감소하는 것을 나타낸다. A시리즈( $w/c=0.53$ )의 경우, 기본 배합(A0)의 28일 압축강도는 36.4 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 28일 압축강도는 각각 35.4, 34.8, 34.2 및 33.9 MPa이다. B시리즈( $w/c=0.46$ )의 경우, 기본 배합의 28일 압축강도는 49.3 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 28일 압축강도는 각각 47.0, 45.5, 44.0 및 42.2 MPa이다. 또한 C시리즈( $w/c=0.36$ )의 경우, 기본 배합의 28일 압축강도는 64.0 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 28일 압축강도는 각각 60.4, 55.3, 54.1 및 51.9 MPa이다. 물-시멘트 비가 0.53, 0.46 및 0.36일 때, 각 기본배합의 28일 압축강도에 대해 순환골재 치환율이 100%일 때의 28일 압축강도는 각각 6.9, 14.4 및 18.9% 감소하였다.

순환골재 콘크리트의 압축강도는 순환골재가 증가할수록 감소하는 뚜렷한 경향을 나타낸다. 콘크리트의 압축강도는 파괴 특성과 연관성이 있다. 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 파괴 특성뿐만 아니라 골재의 파괴 특성이 콘크리트의 압축강도에 영향을 미칠 수 있다. Table 1에 나타낸 바와 같이 순환골재의 흡수율은 천연골재의 흡수율 보다 훨씬 크다. 이는 순환골재의 표면에 부착되어 있는 모르타르 성분 때문이다. 또한, 순환골재는 골재 처리과정에서 파쇄 및 마쇄 과정을 거치므로 공정 특성상 일부 골재는 미세 손상을 받을 가능성

을 배제할 수는 없다. 따라서, 모르타르 성분의 순환골재 콘크리트의 계면파괴에 대한 불리한 영향과 순환골재의 미세한 손상 가능성이 압축강도를 감소시킬 수 있다고 판단된다.

물-시멘트 비( $w/c$ )에 따른 28일 압축강도 실험결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다.  $w/c=0.36$ 일 때의 28일 압축강도에 비해  $w/c=0.46$ 일 때의 28일 압축강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 22.2, 17.7, 18.7 및 18.8% 감소하였다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 7일 압축강도에 비해  $w/c=0.53$ 일 때의 28일 압축강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 41.4, 37.1, 36.8 및 38.9% 감소하였다.

실험결과는 물-시멘트 비의 증가에 따른 28일 압축강도 감소율은 순환골재 치환율이 30%일 때 22.2 및 41.4%로서 가장 크게 감소하는 것을 나타낸다. 이는 물-시멘트 비의 증가에 따른 7일 압축강도 감소율은 순환골재 치환율이 30%일 때 가장 크게 감소한 것과 상응하는 결과이다.

### 3.2 탄성계수

압축강도 실험 시에 탄성계수를 측정하기 위하여 두 개의 원형 치구를 공시체 중앙 100 mm 구간에 설치하였다. 원형 치구 사이에 실린더 공시체 원주방향으로 120° 간격으로 3개의 LVDT를 설치하였으며, 하중재하 시에 변위를 측정하였다 (Fig. 5). 하중재하는 2000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방식으로 하중을 재하하였으며, 0.025 mm/s의 변위제어속도를 사용하였다.

압축강도 실험에서 측정된 하중과 변위를 이용하여 압축강도-변형률 곡선을 측정하였으며, 대표적으로 순환골재 치환율이 50%인 A50, B50 및 C50 배합의 압축응력-변형률 관계 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 압축응력-변형률 곡선에서 변형률이 0.00005인 점과 최대 하중의 40%에 해당하는 점의 선분의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

$$E_c = \frac{f_2 - f_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (1)$$



Fig. 5 Instrumentation for measurement of elastic modulus

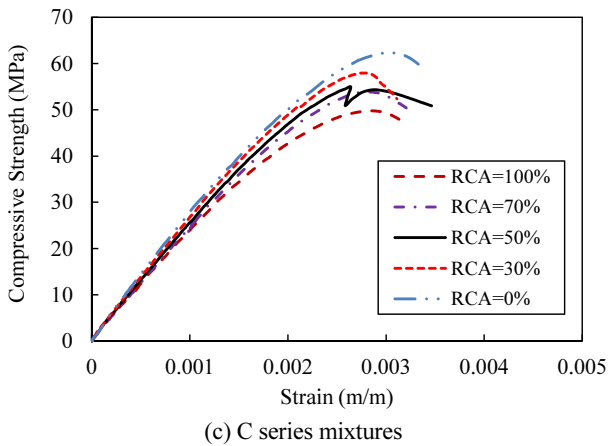
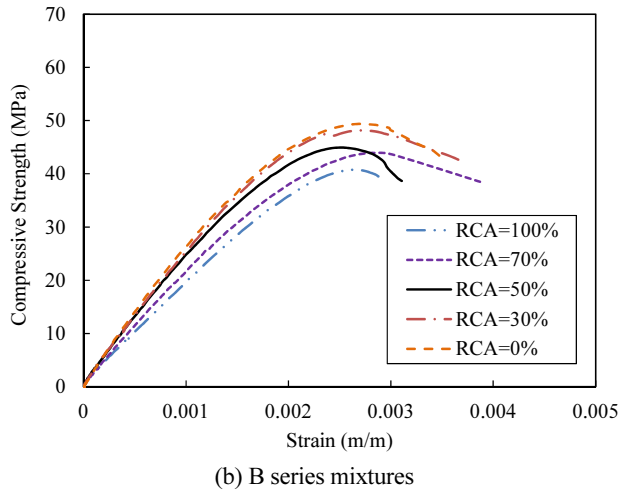
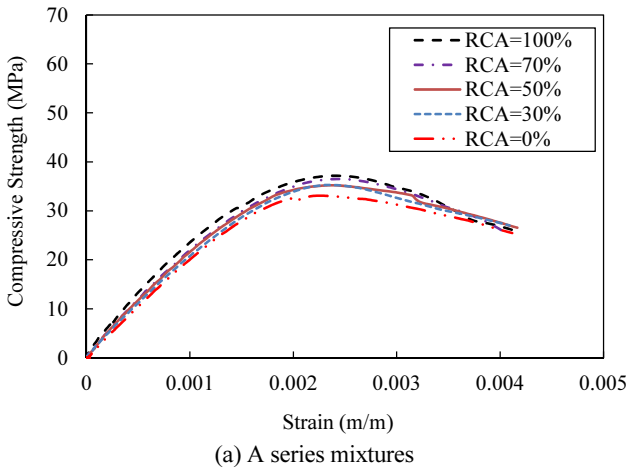


Fig. 6 Compressive stress-strain curves

여기서,

$f_2$ : 콘크리트 압축강도의 40%에 해당하는 압축응력

$f_1$ : 변형률=0.00005에 해당하는 콘크리트 압축응력

$\epsilon_2$ : 콘크리트 압축강도의 40%에 해당하는 압축변형률

$\epsilon_1$ : 변형률=0.00005

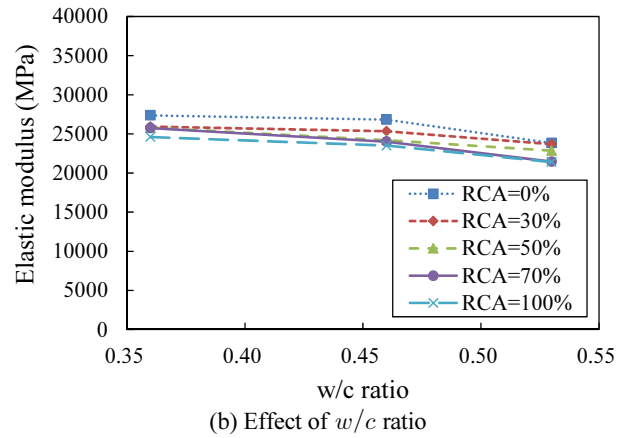
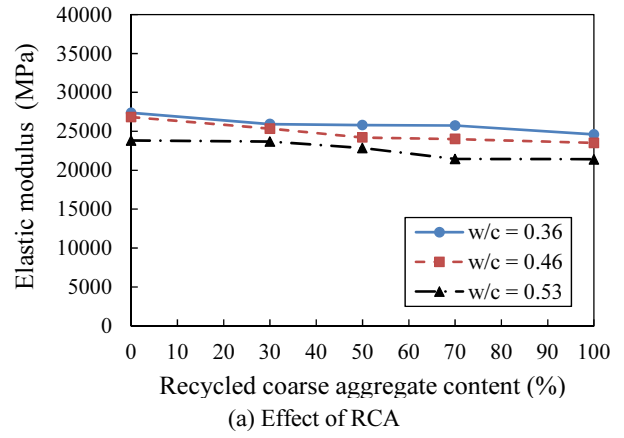


Fig. 7 Comparison of elastic modulus

배합별 탄성계수 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. 굵은순환골재의 치환율이 증가할수록 탄성계수는 감소한다. A시리즈( $w/c=0.53$ )의 경우, 기본 배합(A0)의 탄성계수는 23841 MPa이고, 순환골재 치환율 증가에 따라 A30, A50, A70 및 A100 배합의 탄성계수는 각각 0.6, 4.1, 10.0 및 10.2% 감소하였다. B시리즈( $w/c=0.46$ )의 경우, 기본 배합(B0)의 탄성계수는 26833 MPa이고, 순환골재 치환율 증가에 따라 B30, B50, B70 및 B100 배합의 탄성계수는 각각 5.6, 9.8, 10.5 및 12.4% 감소하였다. 또한 C시리즈( $w/c=0.36$ )의 경우, 기본 배합(C0)의 탄성계수는 27374 MPa이고, 순환골재 치환율 증가에 따라 C30, C50, C70 및 C100 배합의 탄성계수는 각각 5.3, 5.8, 6.0 및 10.1% 감소하였다.

현행 콘크리트표준시방서(KCI, 2009)에서는 굵은순환골재 최대치환율을 30%로 제한하고 있으며, 배합 시리즈 별로 치환율이 30%일 때의 탄성계수 감소율은 각각 0.6%(A30 배합), 5.6%(B30 배합) 및 5.3%(C30 배합) 감소하였다.

또한, 순환골재 치환율이 70%일 때의 탄성계수 감소율은 각각 10.0%(A70 배합), 10.5%(B70 배합) 및 6.0%(C70 배합) 감소하였으며, 순환골재 치환율이 100%일 때의 탄성계수 감

소율은 각각 10.2%(A100 배합), 12.4%(B100 배합) 및 10.1%(C100 배합) 감소하였다. 실험결과는 순환골재를 70% 이상으로 치환할 때, 탄성계수는 10% 이상 감소할 수도 있음을 나타낸다.

물-시멘트 비( $w/c$ )에 따른 탄성계수 실험결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다.  $w/c=0.36$ 일 때의 탄성계수에 비해  $w/c=0.46$ 일 때의 탄성계수는 순환골재 치환을 별로 각각 2.3%(B30 배합), 6.2%(B50 배합), 6.7%(B70 배합) 및 4.4%(B100 배합) 감소하였다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 탄성계수에 비해  $w/c=0.53$ 일 때의 탄성계수는 순환골재 치환을 별로 각각 8.6%(C30 배합), 11.4%(C50 배합), 16.7%(C70 배합) 및 13.0%(C100 배합) 감소하였다. 물-시멘트 비가 0.53일 때의 탄성계수 감소율은 전반적으로 10%를 초과한다.

탄성계수는 콘크리트 부재의 휨강성과 축강성 등에 영향을 미치며, 이에 따라 부재의 처짐 또는 변형에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 물-시멘트 비가 0.50 이내인 배합이 처짐 또는 변형관리 측면에서 유리하다고 판단된다.

현재 설계코드에서의 콘크리트 압축강도를 이용한 탄성계수 산정식은 다음과 같은 형태를 나타낸다.

$$E_c = A (f_{ck})^B \text{ (MPa)} \quad (2)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도,  $A$ 는 계수,  $B$ 는 지수이다. 콘크리트구조기준(KCI, 2012)의 콘크리트의 압축강도를 이용한 탄성계수 산정식은 다음과 같다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

ACI 318-11(ACI, 2011)과 AASHTO LRFD 설계기준(AASHTO, 2014)에서는 콘크리트의 압축강도를 이용한 탄성계수 예측식을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

또한, fib Model Code 2010(fib, 2010)에서의 탄성계수 산정식은 다음과 같다.

$$E_c = E_{co} \left( \frac{f_{ck}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

여기서,  $E_{co}=21500$ (MPa)이다.

Fig. 8에 이 연구에서의 탄성계수 측정결과와 콘크리트구조기준, ACI 318-11 및 fib Model Code 2010의 탄성계수 예측

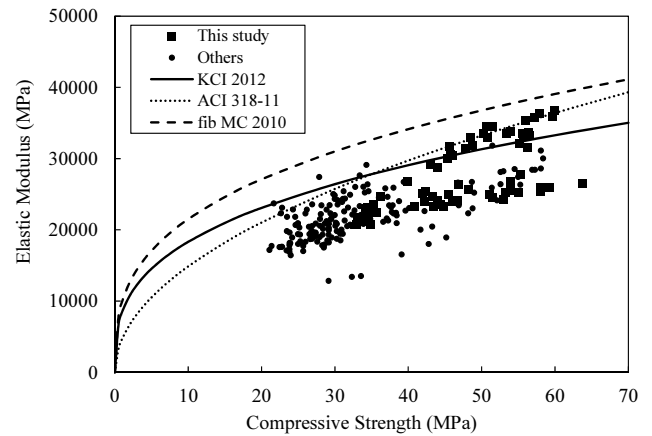


Fig. 8 Elastic modulus versus compressive strength

결과를 비교하여 나타내었다. 또한, 문헌분석(Chung et al., 2006; Jeon et al., 2009; Kim et al., 1996; Sim et al., 2006; Choi et al., 2005; Kim et al., 1993; Kim et al., 1996)을 통해 국내연구에서 168개의 굵은순환골재 콘크리트의 탄성계수 측정값을 획득하였으며, 획득한 실험결과를 같이 나타내었다.

설계코드 식에 의한 탄성계수 예측값은 전반적으로 측정결과를 과다평가하고 있다. 특히 콘크리트구조기준(KCI, 2012)에 의한 예측값은 측정결과를 더욱 과다평가하고 있다.

순환골재 콘크리트의 탄성계수 예측식은 순환골재 콘크리트의 압축강도 한 개만을 종속변수로 사용하는 방법과 순환골재 치환률 및 압축강도를 두 개의 종속변수로 함께 사용하는 방법으로 대별된다. 실험결과는 순환골재의 치환률이 증가할수록 콘크리트의 압축강도는 감소하고, 또한 탄성계수도 감소한다. 순환골재 치환률과 콘크리트의 압축강도는 서로 독립관계가 아니므로 이러한 두 개의 변수를 종속변수로 사용하여 콘크리트 탄성계수를 예측하는 것은 다소 한계가 있다. 따라서, 이 연구에서는 순환골재 콘크리트의 압축강도만을 탄성계수의 종속변수로 이용하여 탄성계수를 예측하고자 하였다(Yang and Jeong 2016).

측정결과를 분석을 토대로 식 (6)의 탄성계수 예측식을 제안하였다. 제안식은 식 (2)에서  $A=7300$ ,  $B=1/3$ 일 때의 예측식이다.

$$E_c = 7,300 \sqrt[3]{f_{ck}} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Fig. 9에 이 연구에서 뿐만 아니라 다른 연구자의 탄성계수 측정결과와 함께 설계코드 제안식에 의한 탄성계수 예측결과를 비교하여 나타내었다. 이 연구에서의 제안식에 의한 탄성계수 예측결과는 설계코드 식에 의한 예측결과보다 순환골재 콘크리트의 탄성계수를 더욱 합리적으로 예측하고 있다. 또

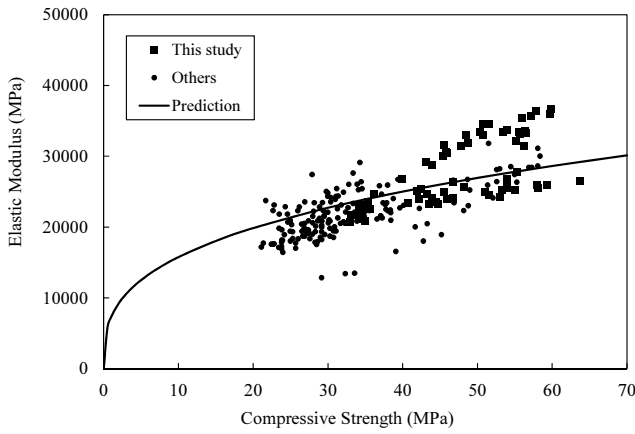


Fig. 9 Predictions of elastic modulus using proposed equation

한, 그림에서 보는 바와 같이 기존 다수의 연구는 압축강도 20~40 MPa 범주의 순환골재 콘크리트의 탄성계수에 대해 수행되었으며, 이 연구에서는 압축강도 30~65 MPa 범주의 탄성계수 측정값을 제시하여 순환골재 적용의 확대 가능성을 제시하였다.

### 3.3 쪼갠장강도

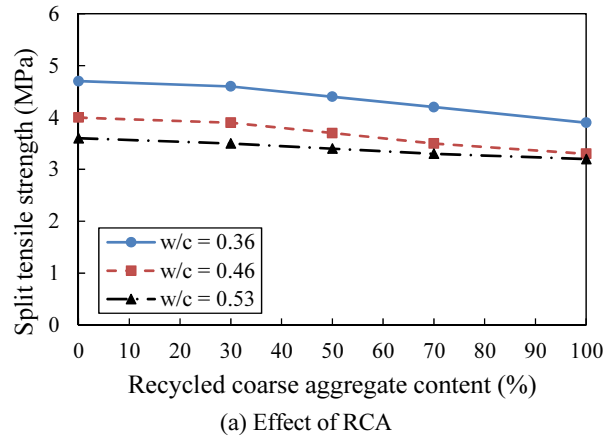
지름이 100 mm이고 높이가 200 mm인 원주형 시편을 이용하여 쪼갠장강도시험을 수행하였다. 쪼갠장강도 시험결과를 Fig. 10에 나타내었다.

순환골재 치환율이 증가할수록 압축강도 및 탄성계수처럼 쪼갠장강도 역시 감소한다. A, B, C 시리즈 별로 기본 배합의 쪼갠장강도에 대해 순환골재 치환율이 30% 일때의 쪼갠장강도는 각각 2.8, 2.5 및 2.1%, 치환율이 50% 일때의 쪼갠장강도는 각각 5.6, 7.5 및 6.4%, 치환율이 70% 일때의 쪼갠장강도는 각각 8.3, 12.5 및 10.6% 감소한다. 또한 순환골재 치환율이 100% 일때의 쪼갠장강도는 각각 11.1, 17.5 및 17.0% 감소한다.

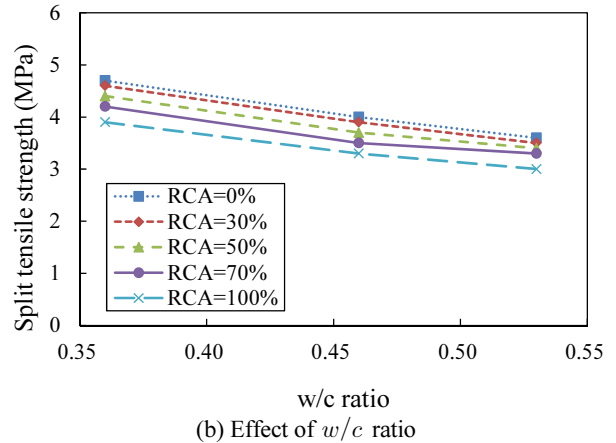
이 연구에서의 실험결과는 콘크리트표준시방서(KCI, 2009)에서 제한하고 있는 30% 이내의 순환골재 치환율 범위에서 쪼갠장강도의 감소율은 3% 이하로써 감소량이 미미한 것을 나타낸다. 반면에, 순환골재 치환율이 100%일 때 모든 배합 시리즈의 쪼갠장강도 감소율은 10%를 초과한다.

물-시멘트 비( $w/c$ )에 따른 쪼갠장강도 실험결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다.  $w/c=0.36$ 일 때의 쪼갠장강도에 비해  $w/c=0.46$ 일 때의 쪼갠장강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 15.2, 15.9, 16.7 및 15.4% 감소하였다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 쪼갠장강도에 비해  $w/c=0.53$ 일 때의 쪼갠장강도는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 23.9, 22.7, 21.4 및 23.1% 감소하였다.

따라서, 실험결과는 순환골재 치환율 수준이 다를지라도



(a) Effect of RCA



(b) Effect of  $w/c$  ratio

Fig. 10 Comparison of split tensile strength

물-시멘트 비의 증가에 따른 쪼갠장강도 감소율은 서로 비슷한 것을 경향을 나타낸다.

### 3.4 파괴계수

단면크기가 100×100 mm이고 길이가 400 mm의 프리즘 형상 시편의 4점하중재하실험을 통하여 순환골재 콘크리트의 파괴계수를 측정하였다. 실험은 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였으며, 0.025 mm/s의 변위제어속도를 사용하였다(Fig. 11). 측정파괴계수 실험결과를 Fig. 12에 나타내었고, 단면의 파괴형상을 Fig. 13에 나타내었다.

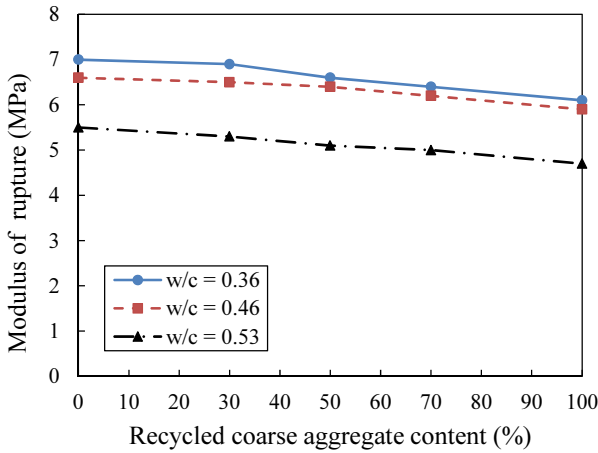
순환골재 치환율이 증가함에 따라 파괴계수는 감소한다. A, B, C 시리즈 별로 기본 배합의 파괴계수에 대해 순환골재 치환율이 30%일 때의 파괴계수는 각각 3.6, 1.5 및 1.4%, 치환율이 50%일 때의 쪼갠장강도는 각각 7.3, 3.0 및 5.7%, 치환율이 70%일 때의 쪼갠장강도는 각각 9.1, 6.1 및 8.6% 감소한다. 또한 순환골재 치환율이 100%일 때의 쪼갠장강도는 각각 14.5, 10.6 및 12.9% 감소한다.

물-시멘트 비에 따른 파괴계수 실험결과를 Fig 12(b)에 나

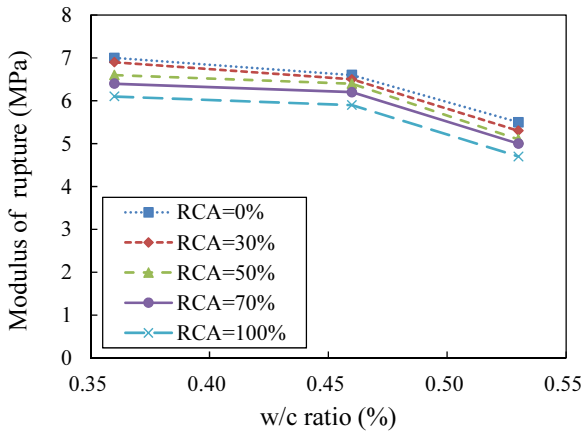




Fig. 11 Test for modulus of rupture



(a) Effect of RCA



(b) Effect of w/c ratio

Fig. 12 Comparison of modulus of rupture

타내었다.  $w/c=0.36$ 일 때의 파괴계수에 비해  $w/c=0.46$ 일 때의 파괴계수는 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 5.8, 3.0, 3.1 및 3.3% 감소하였다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 파괴계수에 비해  $w/c=0.53$ 일 때의 파괴계수는 순환골재 치

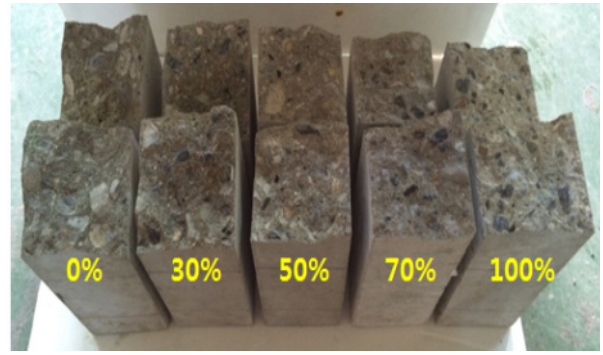


Fig. 13 Cross-section after test for modulus of rupture

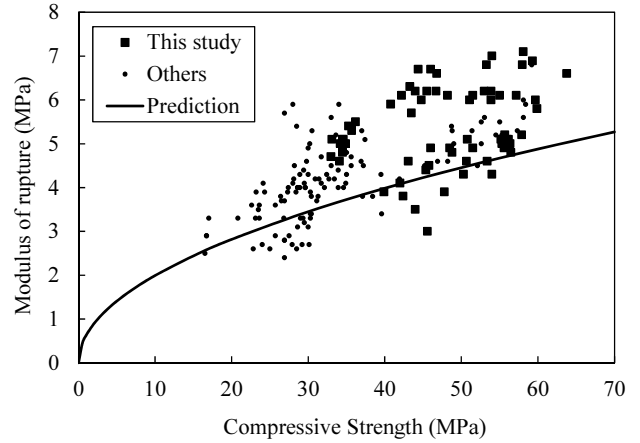


Fig. 14 Modulus of rupture versus compressive strength

환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 각각 23.2, 22.7, 21.9 및 23.0% 감소하였다. 실험결과는 물-시멘트 비가 증가할수록 파괴계수가 감소하는 것을 나타낸다. 또한,  $w/c=0.36$ 일 때의 파괴계수에 대한  $w/c=0.53$ 일 때의 파괴계수 감소율은 앞 절에서 살펴본 조깅인장강도 감소율과 유사한 값을 나타낸다.

콘크리트구조기준(KCI, 2012)과 ACI318-11(ACI, 2011)은 콘크리트 부재의 균열모멘트 산정을 위한 콘크리트의 파괴계수( $f_r$ )를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도이다.

기존 연구결과분석(Chung et al., 2006; Jeon et al., 2009; Kim et al., 1996; Choi et al., 2005; Lee et al., 1999; Lee et al., 2005)을 통하여 104개의 파괴계수 실험결과를 획득하였다. 이 연구에서의 파괴계수 측정결과 뿐만 아니라 문헌분석을 통한 파괴계수 실험결과와 식 (7)에 의한 예측결과를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 콘크리트구조기준에 의한 예측결과는 압축강도 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트의 파괴계수

를 과소평가하고 있다.

기존의 굵은순환골재 콘크리트의 탄성계수 특성에 대한 연구가 주로 압축강도 20~40 MPa 범주에서 수행된 바와 같이, 굵은순환골재를 사용한 콘크리트의 파괴계수에 대한 연구도 주로 압축강도 20~40 MPa 범주에서 수행되었다. 반면에, 이 연구에서는 압축강도 30~65 MPa 범주에서의 파괴계수 측정값을 나타내어 순환골재 적용의 확대 가능성을 제시하였다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 압축강도 30 MPa 이상의 순환골재콘크리트의 기본적인 역학특성을 파악하기 위한 실험연구를 수행하였으며, 주요결론은 다음과 같다.

- 1) 굵은순환골재 치환율이 증가할수록 7일 및 28일 압축강도는 감소한다. 또한, 물-시멘트 비가 0.36에서 0.46 및 0.53으로 증가함에 따라 28일 압축강도 감소율은 순환골재 치환율이 30%일 때 22.2 및 41.4%로서 가장 크게 나타난다.
- 2) 순환골재 치환율이 증가할수록 탄성계수는 감소한다. 또한, 물-시멘트 비가 0.36일 때의 탄성계수에 비해 0.53일 때의 탄성계수는 전반적으로 10% 이상 감소한다. 따라서 탄성계수의 과도한 감소율을 방지하기 위해서는 물-시멘트 비가 0.50 이내인 배합이 유리하다고 판단된다.
- 3) 기존의 설계코드 제안식에 의한 탄성계수 예측결과는 순환골재콘크리트의 탄성계수 측정값을 과다평가한다. 이 연구의 제안식에 의한 예측결과는 실험결과와 잘 일치한다.
- 4) 30% 이내의 순환골재 치환율 범위 내에서 순환골재 콘크리트의 쪼갠인장강도는 뚜렷한 감소를 나타내지 않는다. 반면에 순환골재 치환율이 100%일 때 모든 배합 시리즈의 쪼갠인장강도 감소율은 10%를 초과한다.
- 5) 콘크리트구조기준 및 ACI 318의 파괴계수 산정식은 압축강도 40 MPa 이상의 순환골재콘크리트의 파괴계수를 과소평가하고 있다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2014), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. American Concrete Institute (ACI) (2011), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Report ACI 318-11, American Concrete Institute.
3. Belen, G. F., Fernando, M. A., Diego, C. L., and Sindy, S. P. (2011), Stress-strain Relationship in Axial Compression for Concrete Using Recycled Saturated Coarse Aggregate, *Construction and Building Materials*, 25, 2335-2342.
4. Cabral, A. E. B., Schalch, V., Molin, D. C. C. D., and Ribeiro, J. L. D. (2010), Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 24, 421-430.
5. Choi, M. S., Shin, S. W., Lee, K. S., Ahn, J. M., Kang, H., and Jung, J. (2005), Mechanical properties of recycled aggregate concrete, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 89-92.
6. Choi, H. B., Kim, B. J., Kang, K. I., and Yi, C. K. (2011), Absorption Properties and Shape of Micro-Cracks Incurred in Recycled Aggregate, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 27(3), 83-90.
7. 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.
8. Chung, H. S., Yang, K. H., and Kim, H. H. (2006), The Influence of the Quality and the Replacement Level of Recycled Aggregate on the Mechanical Properties of Concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 22(6), 71-78.
9. Corinaldesi, V. (2010), Mechanical and Elastic Behaviour of Concretes Made of Recycled-Concrete Coarse Aggregates, *Construction and Building Materials*, 24, 1616-1620.
10. Evangelista, L., and de Brito, J. (2007), Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 29, 397-401.
11. Gayarre, F. L., Perez, C. L. C., Lopez, M. A. S., and Cabo, A. D. (2014), The Effect of Curing Conditions on the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 53, 260-266.
12. Huda, S. B., and Alam, M. S. (2014), Mechanical Behavior of Three Generations of 100% Repeated Recycled Coarse Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 65, 574-582.
13. International Federation for Structural Concrete (fib) (2010), Model Code 2010, fib.
14. 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.
15. Jeon, E., Yun, H. D., Ji, S. G., Choi, K. S., You, Y. C., and Kim, K. H. (2009), Mechanical Properties of Ready-Mixed Concrete with Recycled Coarse Aggregates, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 25(8), 103-110.
16. 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.
17. Kim, K. H., Shin, M. S., Kong, Y. S., and Cha, S. W. (2013), Effect of Fly Ash on Rheology and Strength of Recycled Aggregate Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(2), 241-250.
  18. Kim, S. S., Lee, J. B., Ko, J. S., and Kim, I. K. (2013), A Study on the Nano Silica-Sol Coating for Improving Performance of Recycled Aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(4), 84-90.
  19. Kim, S. W., Jung, C. K., Lee, S. H., and Kim, K. H. (2011), Experimental Study on Structural Performance of Recycled Coarse Aggregate Concrete Confined by Steel Spirals, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(1), 103-111.
  20. 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.
  21. 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.
  22. Korea Concrete Institute (KCI) (2009), Standard Specifications for Concrete Construction, Korea Concrete Institute.
  23. Korea Concrete Institute (KCI) (2012), Specifications for Structural Concrete, Korea Concrete Institute.
  24. KS F 2503 (2007), Testing Method for Density and Absorption of Coarse Aggregate, Korea Agency for Technology and Standards.
  25. KS F 2504 (2007), Testing Method for Density and Absorption of Fine Aggregate, Korea Agency for Technology and Standards.
  26. KS F 2573 (2011), Recycled Aggregate for Concrete, Korean Agency for Technology and Standards.
  27. Lee, M. K., and Youn, G. H. (1999), Mechanical properties of recycled aggregate concrete, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 119-122.
  28. Lee, M. K., Kim, K. S., Lee, K. H., and Jung, S. H. (2005), Strength of Recycled Concrete with Furnace Slag Cement under Steam Curing Condition, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17(4), 613-620.
  29. Lee, Y. O., Jeon, E., Yun, H. D., Choi, K. S., Bae, G. S., and Kim, K. H. (2009), The property of compressive strength according to replacement ratio of recycled aggregate, *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 219-220.
  30. 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.
  31. Rahal, K. (2007), Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregate, *Building and Environment*, 42, 407-415.
  32. Shim, J. W. (2010), A Study on the Strength Property of Recycled Fine Aggregate (Wet Type) Mortar with Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(5), 153-160.
  33. Sim, J. S., Park, C., Park, S. J., and Lee, H. C. (2006), Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(1a), 213-218.
  34. 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.
  35. Xiao, J., Li, J., and Zhang, C. (2005), Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Loading, *Cement and Concrete Research*, 35, 1187-1194.
  36. Yang, I. H., and Jeong, J. Y. (2016), Effect of Recycled Coarse Aggregate on Compressive Strength and Mechanical Properties of Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(1), 105-113.
  37. Younis, K. H., and Pilakoutas, K. (2013), Strength Prediction Model and Methods for Improving Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 688-701.

Received : 11/03/2015

Revised : 12/28/2015

Accepted : 01/13/2016

**요 지** : KS기준 및 콘크리트표준시방서에는 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도를 27 MPa 이하로 제한하고 있으며, 이에 따라 27 MPa를 초과하는 순환골재 콘크리트에 대한 역학적 특성에 대한 연구결과는 부족한 상황이다. 따라서, 이 연구에서는 순환골재 사용의 확대를 위해 압축강도 30~60 MPa 범주의 굵은순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도를 포함한 역학적 특성을 연구하였다. 실험변수로써 물-시멘트 비와 굵은순환골재의 치환율을 고려하였다. 고려된 물-시멘트 비는 0.36, 0.46 및 0.53 이고, 순환골재의 치환율은 30, 50, 70 및 100%이다. 실험변수에 따른 순환골재 콘크리트의 7일 및 28일 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 파괴계수 특성을 분석하였다. 물-시멘트 비가 0.36일 때의 탄성계수에 비해 0.53일 때의 탄성계수는 10% 이상 감소하였다. 탄성계수 실험결과와 기존설계코드에 의한 탄성계수 예측결과를 비교하였으며, 설계코드에 의한 탄성계수 예측결과는 실험결과를 과다평가하고 있다. 반면에 설계코드에 의한 파괴계수 예측결과는 압축강도 40 MPa 이상의 콘크리트의 파괴계수 실험결과를 과소평가하고 있다.

**핵심용어** : 순환골재, 물-시멘트 비, 치환율, 역학 특성, 파괴계수