



## 순환굵은골재가 콘크리트의 압축강도 및 역학적 특성에 미치는 영향

양인환<sup>1)\*</sup> · 정준영<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>군산대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>충청대학교 공학기술연구원

### Effect of Recycled Coarse Aggregate on Compressive Strength and Mechanical Properties of Concrete

In-Hwan Yang<sup>1)\*</sup> and Joon-Young Jeong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 54150, Korea

<sup>2)</sup>Research Institute for Engineering & Technology, Chung Cheong University, Cheongju, 28171, Korea

**ABSTRACT** Most studies on mechanical properties of concrete with recycled aggregate was focused on the concrete with compressive strength of less than 40 MPa. Therefore, this paper concerns the compressive strength and mechanical properties of concrete with compressive strength of greater than 40 MPa containing recycled coarse aggregate (RCA). The experimental parameters were compressive strength level and replacement ratio of RCA. Compressive strength level was 45 and 60 MPa, and replacement ratio of RCA was 30, 50, 70 and 100%. The results of the test were discussed: compressive strength, elastic modulus, split tensile strength and modulus of rupture. Test results of elastic modulus were compared to the design code predictions. The design code predictions for elastic modulus overestimated the experimental results. However, the design code predictions for modulus of rupture were generally in agreement with the measured values.

**Keywords** : recycled coarse aggregate, replacement ratio, compressive strength, mechanical properties, elastic modulus

### 1. 서 론

우리나라는 과거 1970~80년대에 급격한 산업발전과 경제성장의 영향으로 인해 콘크리트 구조물의 건설이 급격하게 증가하였다. 1970~80년대에 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 발생 하는 상황에 도달하였다.<sup>1-3)</sup>

또한, 강모래와 강자갈의 고갈로 인해 석산으로부터 골재를 수급하고 있는 상황이며, 건설용 골재 생산을 위한 석산 개발은 주위의 환경과 밀접한 관련성이 있어 제한을 받고 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위한 대안의 하나로써 건설폐기물에서 생산한 순환골재의 재활용 확대가 바람직하며, 이에 대한 심도있는 연구가 필

요한 상황이다.<sup>4-5)</sup>

세계적으로 환경보전정책과 자원재활용을 위해 순환골재의 사용량이 확대되고 있으며 이에 대한 다양한 범주의 순환골재 콘크리트에 대한 연구가 진행되었다. Corinaldesi 등<sup>6)</sup>과 Huda와 Alam<sup>7)</sup>은 굵은순환골재를 사용한 콘크리트의 기본 물성을 연구하였으며, Evangelista 등<sup>8)</sup>은 순환잔골재를 이용한 콘크리트의 기본 물성을 연구하였다. Younis와 Pilakoutas<sup>9)</sup>은 순환골재 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 모델링하고자 하였다. 또한, Gayarre 등<sup>10)</sup>은 양생조건이 순환골재 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 연구하였다.

그러나, 아직까지 국내에서는 순환골재에 대한 긍정적인 인식의 부족과 심도 있는 연구결과의 한계로 도로용, 성토 및 복토 등의 비구조용 콘크리트에 순환골재의 사용이 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 콘크리트표준시방서<sup>11)</sup>에서는 27 MPa 이하의 설계압축강도 조건에서 구조용 콘크리트의 순환골재 함유량을 총용적량의 30% 이하로 제한하고 있는 실정이다.

장재영 등<sup>5)</sup>은 압축강도 25 MPa 이하의 순환굵은골재 콘크리트의 강도 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 정현수 등<sup>12)</sup>은 압축강도 43 MPa 이하의 순환굵은골재 콘크리

\*Corresponding author E-mail : [ihyang@kunsan.ac.kr](mailto:ihyang@kunsan.ac.kr)

Received October 26, 2015, Revised December 22, 2015,

Accepted January 22, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

트의 전단 및 부착강도 특성을 연구하였다. 이명규 등<sup>13)</sup>은 고로슬래그를 사용한 순환골재 콘크리트의 강도 특성을 연구하였고, 전 에스더 등<sup>14)</sup>은 부순골재와 순환골재를 혼합한 골재를 사용한 콘크리트의 물성을 평가한 바 있다. 이와 같이 다수의 기존연구<sup>15-19)</sup>는 콘크리트표준시방서를 만족시키는 고품질의 순환골재를 사용하여 압축강도 40 MPa 이하의 콘크리트에 대한 재료 특성에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트에 대한 역학적 특성에 대한 연구는 미비하며, 순환골재 사용의 확대를 위해서 고강도 순환골재 콘크리트에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 순환골재 콘크리트의 사용범위를 넓히기 위해 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 파괴계수 등의 역학적 특성을 평가하였다. 이 연구의 실험결과를 고강도 영역에서의 순환골재 콘크리트의 성능 평가와 구조물 적용을 위한 유용한 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 순환골재 콘크리트 배합

### 2.1 사용재료

기존 순환골재의 낮은 품질로 인해 압축강도 20~40 MPa의 순환골재 콘크리트 연구가 주를 이루어 진행되었지만, 순환골재 생산과정에서의 추가 공정 및 개선된 공정으로 인해 고품질의 순환골재 생산이 가능해졌다. 순환골재의 활용 증대를 도모하기 위해 본 실험에서는 압축강도 40~60 MPa의



(a) Natural coarse aggregate



(b) Recycled coarse aggregate

Fig. 1 Coarse aggregate used

Table 1 Properties of aggregate

Aggregate	Properties	
	Density	Water absorption
	g/cm <sup>3</sup>	%
Natural coarse aggregate	2.69	1.2
Recycled coarse aggregate	2.32	5.4
Natural fine aggregate	2.59	1.43

고강도 순환골재 콘크리트의 재료 특성을 파악하고자 하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 천연골재는 부순자갈로서 최대직경 25 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였고, 순환골재는 최대직경 25 mm, 최소직경 5 mm의 골재를 사용하였다. 사용된 순환골재의 모양은 화강암이다. Fig. 1은 실험에 사용된 천연골재와 순환골재를 각각 나타내었다. 잔골재는 부순모래를 사용하였다. 사용된 순환골재는 조 크러셔(jaw crusher)와 임팩트 크러셔(impact crusher)등을 사용하여 4차 파쇄 과정을 거친 골재이다.

Table 1에 실험에 사용된 골재의 밀도 및 흡수율 실험 결과를 나타내었다. 현행 KS F 2573<sup>20)</sup>에서는 순환골재의 밀도를 2.50 g/cm<sup>3</sup> 이상과 흡수율을 3% 이하로 제시하고 있으며, 이는 KS F 2526<sup>21)</sup>에서 제시하고 있는 콘크리트용골재의 밀도와 흡수율 조건과 동일한 값으로 매우 보수적인 제안값이다. 이 연구의 순환골재의 밀도는 2.32 g/cm<sup>3</sup>이고 흡수율은 5.4%로서 현행 KS F 2573 기준을 만족하지 못할지라도 순환골재의 활용 가능성을 제시하기 위하여 실험에 사용하였다.

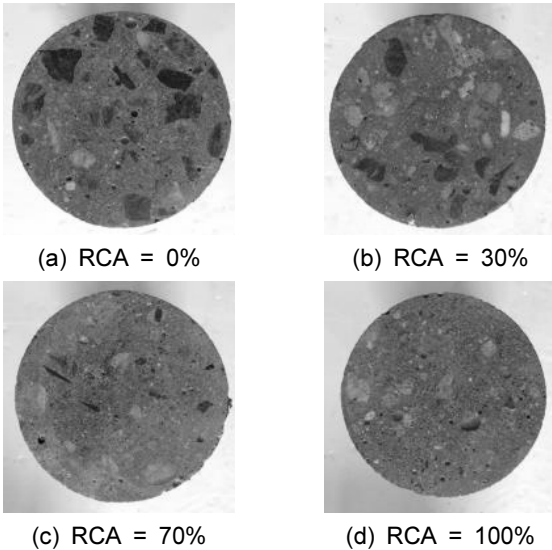
### 2.2 배합

Table 2에 배합설계 표를 나타내었다. 배합설계 시에 콘크리트 설계압축강도와 순환골재 치환율을 실험변수로 고려하였다. 콘크리트의 설계압축강도는 45 및 60 MPa를 고려하였다. 설계압축강도가 45 및 60 MPa일 경우에 물-시멘트 비는 각각 0.43 및 0.32로 일정하게 하였으며, 일정한 물-시멘트 비에서 가능한 적정 배합을 도출하고자 하였다. 또한, 설계압축강도 별로 굵은골재를 30, 50, 70 및 100%의 순환골재로 용적치환을 하였다. 골재의 표면상태는 표면건조내부포화상태(saturated surface-dried)로 배합에 사용하였다. 고성능유동화제(super-plasticizer)를 시멘트 중량비 1.0%를 혼합하였다. 타설 후 시편을 2일 동안 기건양생한 후에 물드를 탈형하고 수조에서 20±3°C의 온도 조건에서 28일까지 양생을 수행하였다.

Table 2에서 시편표기는 설계압축강도와 순환골재 치환율을 의미하도록 나타내었다. 예를 들면, F45R30은 설계압축강도 45 MPa 이고, 순환골재 치환율이 30%인

**Table 2** Mix proportions

Mixtures	$f_{ck}$ (MPa)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )								S.P. (%)
		$w/c$	$S/a$	Water	Cement	Fine agg.	Coarse aggregate			
							Natural	Recycled	Replacement (%)	
F45R0	45	0.43	0.47	174	405	835	961	0	0	1.0  (weight by cement)
F45R30							673	249	30	
F45R50							481	414	50	
F45R70							288	580	70	
F45R100							0	829	100	
F60R0	60	0.32	0.42	161	503	721	995	0	0	
F60R30							697	257	30	
F60R50							498	423	50	
F60R70							299	592	70	
F60R100							0	846	100	



**Fig. 2** Cross-section of specimen with various contents of recycled coarse aggregate

배합이다.

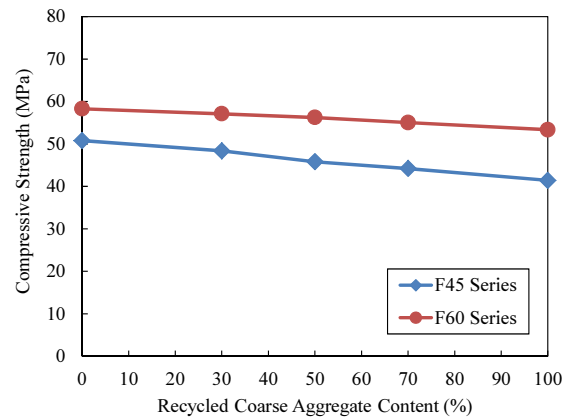
설계압축강도 및 순환골은골재 치환율에 따른 각 배합 별로 압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도 및 파괴계수 측정용 시험시편을 3개씩 제작하여 콘크리트의 물성에 대한 영향을 평가하고자 하였다.

Fig. 2에 일반골재 및 순환골재를 사용한 콘크리트의 단면을 비교하여 나타내었다. Fig. 2의 일반골재 콘크리트는 모서리가 각진 골은골재 형상을 나타내고 검은색을 나타내는 반면에, 순환골재는 옅은 회색을 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 압축강도

Table 3에 성능평가 항목별 측정결과를 나타내었으며, 각



**Fig. 3** Comparison of compressive strength

**Table 3** Test results

Mixtures	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Split tensile strength (MPa)	Modulus of rupture (MPa)
F45R0	50.8	34,162	3.88	4.58
F45R30	48.4	32,104	3.80	4.48
F45R50	45.8	30,855	3.64	4.14
F45R70	44.2	29,963	3.35	4.17
F45R100	41.4	25,738	3.10	3.88
F60R0	58.3	35,998	4.39	5.84
F60R30	57.1	34,440	4.27	5.30
F60R50	56.2	33,365	4.04	5.03
F60R70	55.0	33,041	3.82	4.90
F60R100	53.4	31,472	3.59	4.76

배합의 측정항목마다 3개 시편의 실험결과와 평균값을 나타내었다. 압축강도실험은 직경 100 mm이고 높이가 200 mm 인 실린더 공시체를 이용하여 측정하였으며, Fig. 3에 압

축강도 측정결과를 나타내었다.

F45 시리즈의 일반골재 콘크리트(F45R0 배합)의 압축강도는 50.8 MPa로서 설계압축강도 45 MPa를 초과한다. 반면에 F60 시리즈의 일반골재 콘크리트(F60R0 배합)의 압축강도는 58.3 MPa로서 설계압축강도 60 MPa에 미치지 못하였으나, 고강도 순환골재 콘크리트 물성에 관한 유용한 정보를 제공한다.

순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트 압축강도는 감소한다. F45 시리즈의 경우, 일반골재 콘크리트(치환율=0%)의 압축강도는 50.8 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 콘크리트 압축강도는 각각 48.4, 45.8, 44.2 및 41.4 MPa로 나타난다. 순환골재 치환율에 따라 콘크리트 압축강도는 각각 4.7, 9.8, 13.0 및 18.5% 감소하였다. 또한, F60 시리즈의 경우, 순환골재를 포함하지 않는 콘크리트의 압축강도는 58.3 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때 콘크리트 압축강도는 각각 57.1, 56.2, 55.0 및 53.4 MPa로 나타난다. 순환골재 치환율에 따라 콘크리트 압축강도는 각각 2.4, 4.1, 6.5 및 9.6% 감소하였다.

동일한 순환굵은골재 치환율에 대하여 F45 시리즈의 콘크리트 압축강도 감소율이 F60 시리즈의 콘크리트 압축강도 감소율보다 큰 것으로 나타난다. 이러한 실험결과는 고강도 콘크리트일수록 순환골재 치환율에 따라 압축강도 감소율이 상대적으로 작은 것을 의미한다.

Table 2의 배합표에서 F60 배합의 단위시멘트량은 F45 배합의 단위시멘트량보다 많다. F45 배합에서 단위시멘

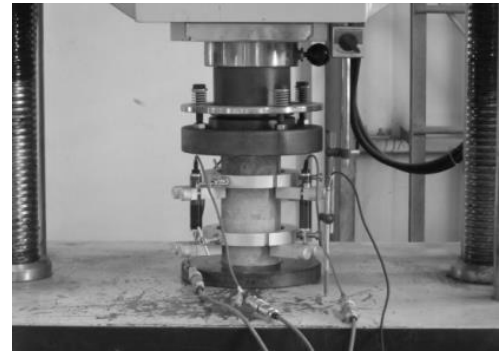


Fig. 4 Instrumentation for measurement of elastic modulus

트량이 압축강도에 미치는 영향보다 F60 배합에서 단위시멘트량이 압축강도에 미치는 영향이 상대적으로 크고, 굵은골재가 압축강도에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 판단된다. 이러한 실험결과는 고강도 콘크리트일수록 단위시멘트량이 증가하므로 순환골재 치환이 압축강도 감소에 미치는 영향이 작은 것을 나타낸다.

### 3.2 탄성계수

압축강도 실험 시에 탄성계수를 측정하기 위하여 두 개의 LVDT를 고정하기 위한 원형 치구를 공시체 중앙 100 mm 구간에 설치하였다. 원형 치구 사이에 실린더 공시체 원주방향으로 120° 간격으로 3개의 LVDT를 설치하였으며, 하중재하 시에 변위를 측정하였다(Fig. 4). 하중

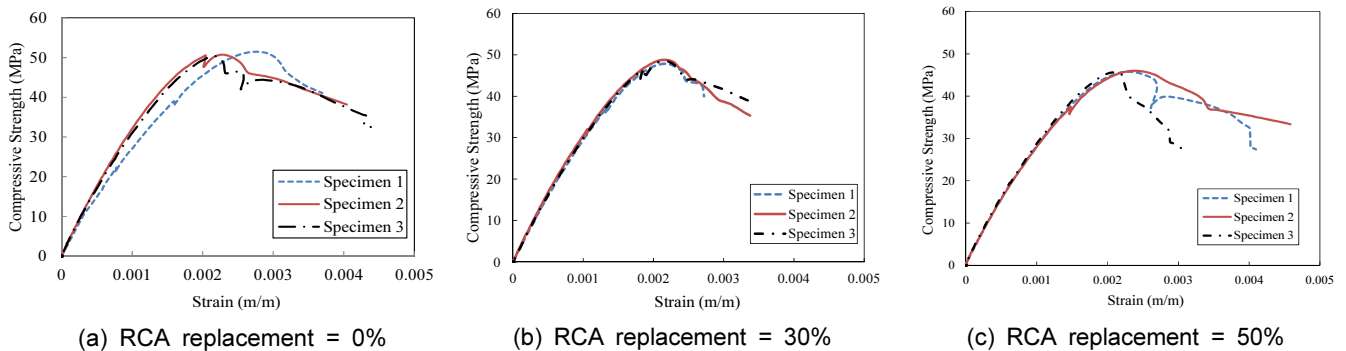


Fig. 5 Compressive stress-strain curve (F45 series)

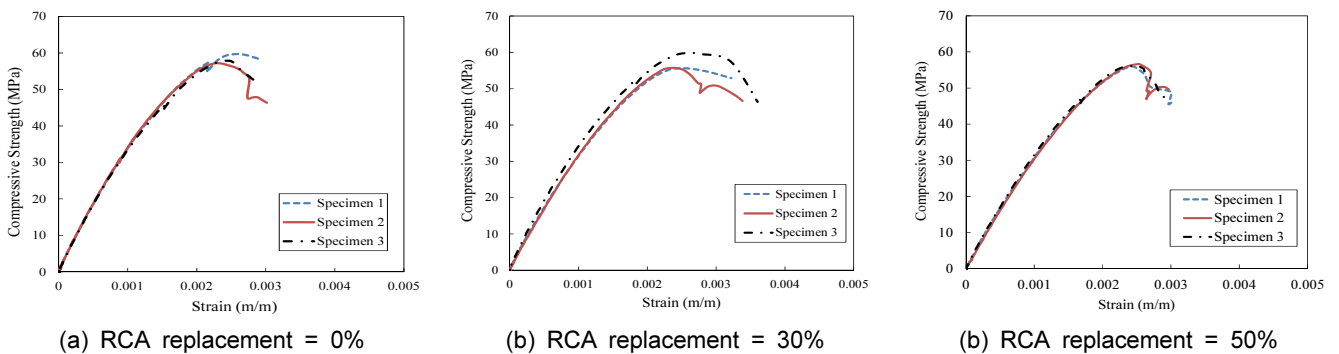


Fig. 6 Compressive stress-strain curve (F60 series)

재하는 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방식으로 하중을 재하하였다.

압축강도 실험에서 측정된 하중과 변위를 이용하여 압축강도-변형률 곡선을 측정하였으며, 대표적으로 F45 및 F60 배합시리즈의 순환골재 치환율이 0, 30 및 50% 일 때의 압축응력-변형률 관계 곡선을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 압축응력-변형률 곡선에서 변형률이 0.00005 인 점과 최대 하중의 40%에 해당하는 점의 선분의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

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

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. 7에 배합별 탄성계수 측정결과를 나타내었다. 순환골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트 탄성계수는 감소한다. F45 시리즈의 경우, 일반골재 콘크리트의 탄성계수는 34,162 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때의 탄성계수는 각각 일반골재 콘크리트 탄성계수 비해 6.0, 9.7, 12.3 및 24.7% 감소한다. F60 시리즈의 경우, 일반골재 콘크리트의 탄성계수는 35,998 MPa이고, 순환골재 치환율이 30, 50, 70 및 100%일 때의 탄성계수는 각각 일반골재 콘크리트 탄성계수 비해 4.3, 7.3, 8.2 및 12.6% 감소한다.

F60 시리즈의 탄성계수 감소율이 F45 시리즈의 탄성계수 감소율보다 작게 나타난다. 이는 고강도 콘크리트 일수록 순환골재의 치환에 따른 탄성계수 감소 영향이 작은 것을 의미한다. 또한, F45와 F60 시리즈 별로 동일한 순환골재 치환율에 대해 탄성계수 감소율은 앞 절에서 살펴 본 압축강도 감소율보다 큰 값을 나타낸다. 순환골재의 치환률별 탄성계수와 압축강도 저감은 순환골재의 모르타르량 및 부착 특성, 굳은 콘크리트의 순환골재

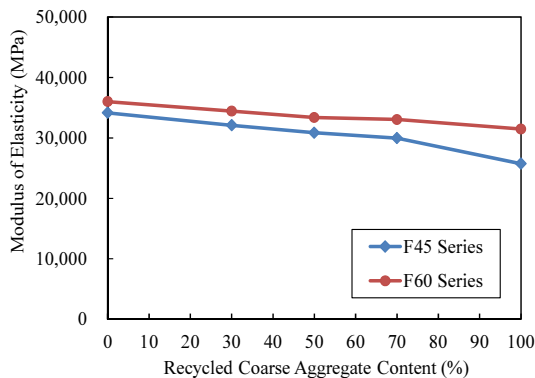


Fig. 7 Comparison of elastic modulus

와 시멘트 페이스트 계면사이의 부착특성 등에 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이러한 특성은 콘크리트 미세구조(micro-structure)의 특성 분석을 통해 객관적인 추론이 가능하며, 이에 대한 추후 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 탄성계수의 뚜렷한 감소는 순환골재 콘크리트를 구조 부재에 적용할 때 강성의 감소를 유발하여 처짐 증가를 유발할 수 있으므로 사용성 설계 시 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

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

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

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도이다.

콘크리트구조기준<sup>22)</sup>의 콘크리트의 압축강도를 이용한 탄성계수 산정식은 다음과 같다.

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

여기서,  $f_{cu}$ : 재령 28일에서의 콘크리트 압축강도

$$= f_{ck} + \Delta f$$

$f_{ck}$ : 콘크리트의 설계기준 압축강도로서,  $f_{ck}$ 가 40 MPa 이면 4 MPa, 60 MPa 이상이면 6 MPa이며, 그 사이는 직선보간으로 한다.

ACI 318-11<sup>23)</sup>과 AASHTO LRFD 설계기준<sup>24)</sup>에서는 콘크리트의 압축강도를 이용한 탄성계수 예측식을 다음과 같이 제시하고 있다.

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

또한, fib Model Code 2010<sup>25)</sup>에서의 탄성계수 산정식은 다음과 같다.

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

여기서,  $E_{co}$ =21,500 (MPa)이다.

Fig. 8에 이 연구에서의 탄성계수 측정결과와 콘크리트 구조기준, ACI 318-11 및 fib Model Code 2010의 탄성계수 예측결과를 비교하여 나타내었다. 또한, 이 연구에서는 문헌분석<sup>12,14-18)</sup>을 통해 국내에서 수행된 174개의 굵은 순환골재 콘크리트의 탄성계수 측정값을 획득하였으며, 획득한 실험결과를 같이 나타내었다.

설계코드 식에 의한 탄성계수 예측값은 전반적으로 측정결과를 과다평가하고 있다. 특히 ACI318-11에 의한 예측값은 이 연구의 측정결과를 더욱 과다평가하고 있다. 측정결과와 분석을 토대로 식 (6)의 탄성계수 예측식을

제안하였다. 식 (6)은 식 (2)에서  $A=7,600$ ,  $B=1/3$ 일 때의 예측식이다. 순환골재 콘크리트의 탄성계수 예측식은 순환골재 콘크리트의 압축강도만을 종속변수(dependent variable)만을 사용하는 방법과 순환골재 치환률 및 압축강도 2개의 종속변수를 같이 사용하는 방법으로 대별된다. 논문의 앞 절에 나타난 바와 같이 순환골재의 치환률이 증가할수록 콘크리트의 압축강도는 감소하고, 또한 탄성계수도 감소한다. 순환골재 치환률과 콘크리트의 압축강도는 서로 독립관계(independent variables)가 아니므로 독립이 아닌 두 개의 변수를 종속변수로 사용하여 콘크리트 탄성계수를 예측하는 것은 한계가 있다. 따라서, 이 연구에서는 순환골재 콘크리트의 압축강도만을 탄성계수의 종속변수로 이용하여 탄성계수를 예측하고자 하였다.

$$E_c = 7,600 \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

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. 또한, Fig. 9에서 보는 바와 기존의 다수의 연구는 압축강도 20~40 MPa 범주의 순환골재 콘

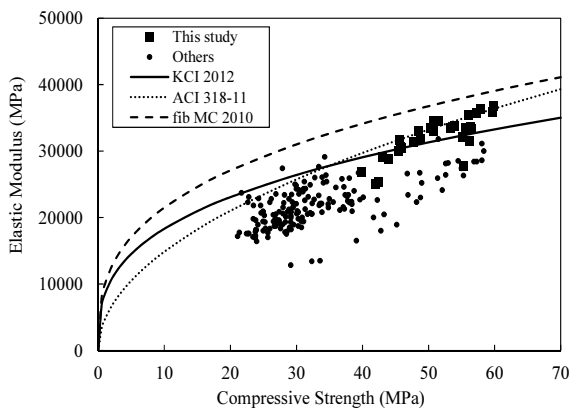


Fig. 8 Elastic modulus versus compressive strength

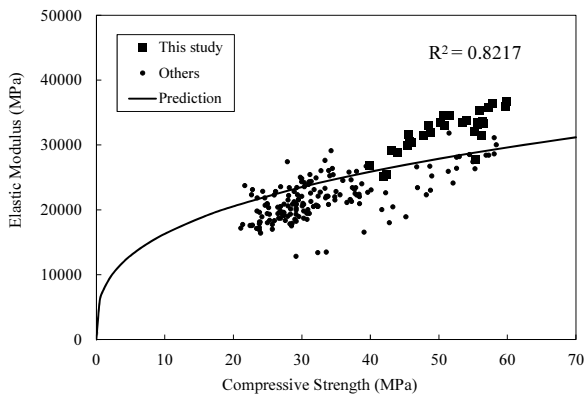


Fig. 9 Predictions of elastic modulus using proposed equation

크리트의 탄성계수에 대해 수행되었으며, 이 연구에서는 압축강도 40~60 MPa 범주의 탄성계수 측정값을 제시하여 순환골재 적용의 확대 가능성을 제시하였다.

### 3.3 쪼갬인장강도

지름이 100 mm이고 높이가 200 mm인 원주형 시편을 이용하여 쪼갬인장강도시험을 수행하였다. 쪼갬인장강도 시험결과를 Table 3과 Fig. 10에 나타내었다.

순환골재 치환율이 증가할수록 압축강도 및 탄성계수 처럼 쪼갬인장강도 역시 감소하는 것을 나타낸다. F45 시리즈의 경우, 일반골재 콘크리트(치환율=0%)의 쪼갬인장강도는 3.88 MPa이고, 치환율이 30%인 순환골재 콘크리트의 쪼갬인장강도는 3.80 MPa로서 콘크리트표준시방서<sup>11)</sup>에서 제한하고 있는 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반콘크리트의 쪼갬인장강도와 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 반면에, 순환골재 치환율이 50, 70 및 100%일 때 콘크리트 쪼갬인장강도는 각각 3.64, 3.35 및 3.10 MPa로서, 순환골재 치환율에 따라 6.1, 13.8 및 20.2% 감소한다. F60 시리즈의 경우, 일반골재 콘크리트의 쪼갬인장강도는 4.39 MPa이고, 치환율이 30%인 순환골재 콘크리트의 쪼갬인장강도는 4.27 MPa로서 F45 시리즈의 경향에서 나타난 바와 유사하게 순환골재 치환율 30% 이내의 범위에서는 일반콘크리트의 쪼갬인장강도와 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 또한, 순환골재 치환율이 50, 70 및 100%일 때 콘크리트 쪼갬인장강도는 각각 4.04, 3.82 및 3.59 MPa로서, 순환골재 치환율에 따라 8.0, 12.9 및 20.4% 감소한다.

이 연구에서의 실험결과는 30% 이하의 순환골재 치환율 범위 내에서 일반골재 콘크리트의 쪼갬인장강도에 비해 순환골재 콘크리트의 쪼갬인장강도는 뚜렷한 감소가 나타나지 않는 것을 나타낸다. F45 시리즈의 순환골재 치환율이 100%일 때 쪼갬인장강도 감소율은 20.2%이고, F60 시리즈의 순환골재 치환율이 100%일 때 쪼갬인장강도 감소율은 20.4%이다. 실험결과는 순환골재 치환율이 100%일 때 쪼갬인장강도 감소율이 유사한 것을 나타낸다.

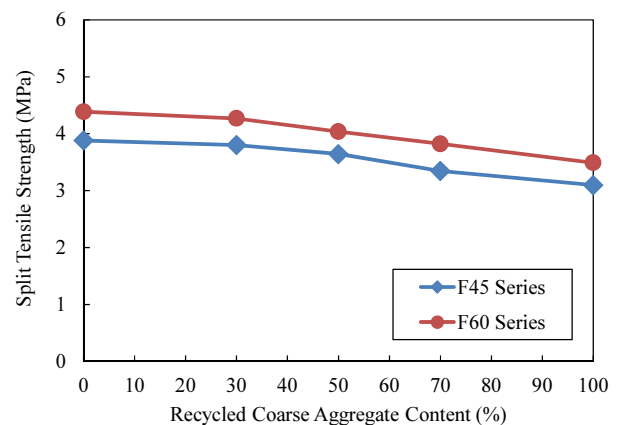


Fig. 10 Comparison of split tensile strength

### 3.4 파괴계수

크기가 100×100×400 mm의 프리즘 형상 시편의 4점하중재하실험을 통하여 일반굵은골재 대비 순환굵은골재 치환율에 따른 순환골재 콘크리트의 파괴계수(modulus of rupture)를 측정하였다. 실험은 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였다. 파괴계수 실험결과를 Table 3과 Fig. 11에 나타내었다.

순환골재 치환율이 증가함에 따라 파괴계수는 감소한다. F45 시리즈의 경우, 치환율이 0, 30, 50, 70 및 100% 일 때의 파괴계수는 각각 4.58, 4.48, 4.14, 4.17 및 3.88 MPa이다. 일반골재 콘크리트에 비해 순환굵은골재로 100% 치환한 콘크리트의 파괴계수는 15.3% 감소하였다. 또한 F60 시리즈의 경우, 치환율이 0, 30, 50, 70 및 100% 일 때의 파괴계수는 각각 5.84, 5.30, 5.03, 4.90 및 4.76 MPa이다. 일반골재 콘크리트에 비해 순환굵은골재로 100% 치환한 콘크리트의 파괴계수는 18.5% 감소하였다.

콘크리트구조기준<sup>22)</sup>과 ACI318-11<sup>23)</sup>는 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.

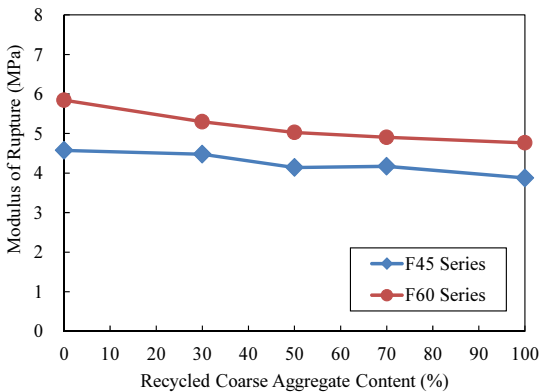


Fig. 11 Comparison of modulus of rupture

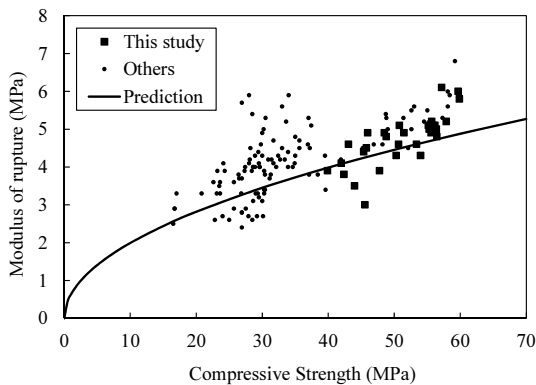


Fig. 12 Modulus of rupture versus compressive strength

기존 문헌분석<sup>12-15,17,19)</sup>을 통하여 112개의 파괴계수 실험결과를 획득하였다. 이 연구에서의 파괴계수 측정결과, 문헌분석을 통한 파괴계수 실험결과 및 식(7)에 의한 예측결과를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 비교결과는 콘크리트구조기준에 의한 예측결과는 순환굵은골재 콘크리트의 파괴계수를 전반적으로 잘 예측하는 것을 나타낸다.

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 40~60 MPa 범주에서의 파괴계수 측정값을 나타내어 순환골재 적용의 확대 가능성을 제시하였다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 굵은순환골재를 사용하여 설계압축강도 40 MPa 이상의 콘크리트의 재료특성 실험을 토대로 순환골재 콘크리트의 기본적 역학특성을 파악하였으며, 주요결론은 다음과 같다.

- 1) 동일한 순환굵은골재 치환율에 대하여 압축강도 45 MPa 시리즈의 콘크리트 압축강도 감소율이 압축강도 60 MPa 시리즈의 콘크리트 압축강도 감소율 보다 큰 것으로 나타난다. 이러한 실험결과는 고강도 콘크리트 일수록 순환골재 치환율에 따라 압축강도 감소율이 작은 것을 의미한다.
- 2) 순환골재 치환율이 증가할수록 탄성계수는 감소하며, 순환골재 치환율 증가에 따른 탄성계수 감소율은 압축강도 감소율보다 크게 나타난다.
- 3) 기존의 설계코드 제안식에 의한 탄성계수 예측결과는 순환골재 콘크리트의 탄성계수 측정값을 과다평가하고 있으며, 이 연구에서 제시한 예측결과는 비교적 실험결과와 잘 일치하고 있다.
- 4) 콘크리트표준시방서는 순환골재 치환율을 30% 이하로 제한하고 있으며, 30% 이내의 순환골재 치환율 범위 내에서 순환골재 콘크리트의 쪼갬인장강도는 뚜렷한 감소를 나타내지 않는다.
- 5) 콘크리트구조기준에 의한 파괴계수 예측결과는 순환골재 콘크리트의 파괴계수 측정값을 전반적으로 잘 예측하는 것을 나타낸다.

## 감사의 글

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

## References

1. Kim, K.H., Shin, M.S., Kong, Y.S., and Cha, S.W., "Effect of Fly Ash on Rheology and Strength of Recycled Aggregate Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.2, 2013, pp.241-250.
2. Kim, S.W., Na, D.S., Lee, D.W., and Kim, B.K., "An Experimental Study on the Strength Properties of the Recycling Aggregate Concrete by Curing Condition", *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 1996, pp.24-30.
3. Choi, H.B., Shin, Y.S., An, S.H., Chung, H.S., and Kang, K.I., "A Properties and Durability of Recycled Aggregate Concrete", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.23, No.9, 2007, pp.125-132.
4. Lee, Y.O., Jeon, E., Yun, H.D., Choi, K.S., Bae, G.S., and Kim, K.H., "The Property of Compressive Strength according to Replacement Ratio of Recycled Aggregate", *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 2009, pp.219-220.
5. Jang, J.Y., Jin, J.H., Cho, G.T., Nam, Y.K., and Jeon, C.K., "Strength Characteristics of Recycled Concrete by Recycled Aggregate in Incheon Area Waste Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.2, 2003, pp.197-208.
6. Corinaldesi, V., "Mechanical and Elastic Behaviour of Concretes Made of Recycled-Concrete Coarse Aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol.24, 2010, pp.1616-1620.
7. Huda, S.B., and Alam, M.S., "Mechanical Behavior of Three Generations of 100% Repeated Recycled Coarse Aggregate Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.65, 2014, pp.574-582.
8. Evangelista, L., and de Brito, J., "Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates", *Cement & Concrete Composites*, Vol.29, 2007, pp.397-401.
9. Younis, K.H., and Pilakoutas, K., "Strength Prediction Model and Methods for Improving Recycled Aggregate Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.49, 2013, pp.688-701.
10. Gayarre, F.L., Perez, C.L.C., Lopez, M.A.S., and Cabo, A.D., "The Effect of Curing Conditions on the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.53, 2014, pp.260-266.
11. Korea Concrete Institute (KCI) "Standard Specifications for Structural Concrete", Korea Concrete Institute, 2009.
12. 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 Architectural Institute of Korea*, Vol.22, No.6, 2006, pp.71-78.
13. Lee, M.K., and Youn, G.H., "Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete", *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 1999, pp.119-122.
14. Jeon, E., Yun, H.D., Ji, S.G., Choi, K.S., You, Y.C., and Kim, K.H., "Mechanical Properties of Ready-Mixed Concrete with Recycled Coarse Aggregates", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.25, No.8, 2009, pp.103-110.
15. Kim, K.W., Li, X.F., Choi, Y.K., Cho, H.W., and Jung, K.D., "Variation of Strength Characteristics of Recycled Concrete due to Different Recycled Aggregate Contents", *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 1996, pp.32-36.
16. Sim, J.S., Park, C., Park, S.J., and Lee, H.C., "Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.1a, 2006, pp.213-218.
17. Choi, M.S., Shin, S.W., Lee, K.S., Ahn, J.M., Kang, H., and Jung, J., "Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete", *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 2005, pp.89-92.
18. Kim, M.H., Lee, B.H., Kim, J.M., and Lee, S.S., "A Fundamental Study on the Applicability of Construction of Recycled Aggregate Concrete( I )", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.9, No.8, 1993, pp.201-211.
19. Lee, M.K., Kim, K.S., Lee, K.H., and Jung, S.H., "Strength of Recycled Concrete with Furnace Slag Cement under Steam Curing Condition", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.4, 2005, pp.613-620.
20. KS F 2573, Recycled Aggregate for Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2011.
21. KS F 2526, Concrete Aggregate, Korean Agency for Technology and Standards, 2012.
22. Korea Concrete Institute (KCI) "Specifications for Structural Concrete", Korea Concrete Institute, 2012.
23. American Concrete Institute (ACI). "Building code requirements for structural concrete and commentary", Report ACI 318-11, American Concrete Institute, 2011.
24. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
25. International Federation for Structural Concrete (fib), "Model Code 2010", 2010, fib.



---

**요약** 순환골재를 사용한 콘크리트의 재료 및 역학 특성에 관한 대부분의 연구는 압축강도 40 MPa 이하의 콘크리트에 대하여 수행되었으며, 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트에 대한 역학적 특성에 대한 연구결과는 미비하다. 따라서, 이 연구에서는 순환골재 사용의 확대를 위해 40 MPa 이상의 순환골재 콘크리트의 압축강도 및 역학 특성을 파악하였다. 순환골재 콘크리트의 역학 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 압축강도 및 순환굵은골재 치환율을 실험변수로 고려하였다. 실험변수로서 콘크리트의 압축강도는 45 및 60 MPa이고, 순환골재 치환율은 30, 50, 70 및 100%이다. 실험변수에 따른 순환골재 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 파괴계수 특성을 분석하였다. 실험결과는 고강도 콘크리트일수록 순환골재 치환율에 따른 압축강도 감소량이 작은 것을 나타낸다. 탄성계수 실험결과와 기존설계코드에 의한 탄성계수 예측결과를 비교하였으며, 설계코드에 의한 예측결과는 실험결과를 과다평가하고 있다. 반면에 설계코드에 의한 파괴계수 예측결과와 실험결과는 잘 일치한다.

**핵심용어** : 순환굵은골재, 치환율, 압축강도, 역학적 특성, 탄성계수