

# 순환 굵은 골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화 검토 사례 연구

## Review of Changes in Mechanical Properties of Concrete According to Recycled Coarse Aggregate Replacement Rate Case Study

남영진<sup>1</sup> · 김태형<sup>1</sup> · 김원창<sup>2</sup> · 이태규<sup>3\*</sup>

Young-Jin Nam<sup>1</sup> · Tae-Hyung Kim<sup>1</sup> · Won-Chang Kim<sup>2</sup> · Tae-Gyu Lee<sup>3\*</sup>

(Received May 15, 2024 / Revised June 18, 2024 / Accepted June 19, 2024)

In this study, it was determined that it was necessary to consider the replacement rate when applying recycled coarse aggregate to concrete, so data on existing research trends and results were collected and the mechanical properties of concrete according to the replacement rate of recycled coarse aggregate were analyzed. In collecting data on recycled coarse aggregate, data without processes such as compressive strength and removal of residual mortar attached to recycled coarse aggregate were collected among the concrete measurement items. In the case of concrete with 50 % and 100 % replacement of recycled coarse aggregate, it was confirmed that the mechanical properties were lower or higher than ordinary concrete by -36.0 ~ 9.9 % and -40.0 ~ 10.4 %, respectively, on average. Accordingly, it is judged that additional water should be mixed in consideration of the absorption rate when mixing, and the replacement rate of recycled coarse aggregate, which has mechanical properties of 80 % or more compared to ordinary concrete, should be less than 50 %.

**키워드** : 순환 굵은 골재, 콘크리트, 치환비율, 역학적 특성

**Keywords** : Recycled coarse aggregate, Concrete, Replacement rate, Mechanical properties

### 1. 연구 개요

최근 재개발 및 재건축 등으로 인해 도시화가 가속화됨에 따라 건축물의 철거 작업이 지속해서 진행되고 있으며, 이에 따라 폐기물 중 건설폐기물의 발생량이 지속해서 발생하고 있다(Ismail and Ramli 2014). 한국환경공단(KEC, 2023)에 따르면 건설폐기물은 총폐기물 발생량에서 40.9 % 이상으로 상당 부분을 차지하는 것을 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 또한 환경오염과 한정적인 천연 자원의 사용을 고려하여 건설폐기물을 재활용하는 것은 건설산업의 지속성에 대한 영향을 상당 부분 미칠 것으로 판단된다. 건설폐기물 중 폐콘크리트가 70.5 % 차지하기 때문에 폐콘크리트를 활용할 수 있는 방법에 관련된 연구가 지속해서 수행되고 있다.

건축물에 사용되는 콘크리트의 약 70 % 정도 골재를 차지하고 있으며, 대형 및 고층 건축물의 건설 수가 늘어남에 따라 천연골재

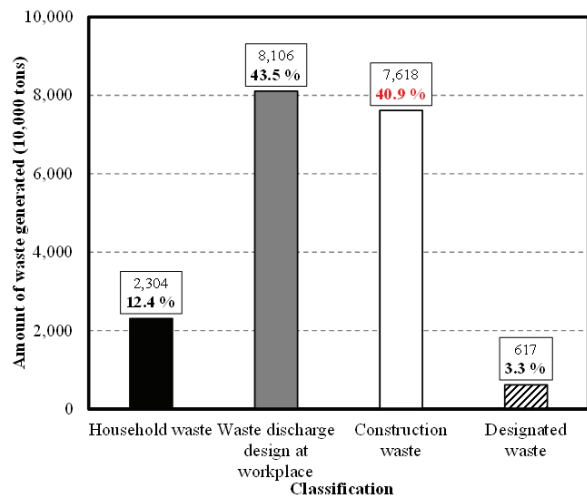


Fig. 1. Emissions by waste type

\* Corresponding author E-mail: [ltg777@semyung.ac.kr](mailto:ltg777@semyung.ac.kr)

<sup>1</sup>세명대학교 소방방재공학과 석사과정 (Department of Fire and Disaster, Semyung University, Chungbuk, 27136, Korea)

<sup>2</sup>세명대학교 소방방재공학과 박사과정 (Department of Fire and Disaster, Semyung University, Chungbuk, 27136, Korea)

<sup>3</sup>세명대학교 소방방재학과 교수 (Department of Fire and Disaster, Semyung University, Chungbuk, 27136, Korea)

의 수급에 대한 문제를 해결하기 위해 폐콘크리트에서 추출할 수 있는 순환 굵은 골재 활용에 관심이 높아지고 있다. 순환 굵은 골재는 모르타르가 부착되어 있어서 다공성이 높고 밀도가 낮은 특징이 있다. 또한 다공성은 콘크리트 배합 시 물에 대한 수요를 증가시켜 압축강도 감소 등과 같은 역학적 특성의 저하 요인이 된다.

Thomas et al.(2013)에 따르면 순환 굵은 골재의 혼입으로 인한 W/C 및 골재 치환 정도에 따라 콘크리트의 역학적 특성이 변화하며, 골재 치환율 20 %를 초과하였을 때 보통 콘크리트에 비해 역학적 특성의 저하를 나타냈다고 보고되었다. 또한 W/C이 낮아짐에 따라 골재 치환율이 높아질수록 보통 콘크리트 역학적 특성과의 격차가 커지는 경향을 보였다.

Tam et al.(2005)에 따르면 순환 굵은 골재의 기존 모르타르와 새로운 모르타르 사이에서 수분 흡수, 높은 다공성 및 약한 ITZ(Interfacial Transition Zone)로 인해 순환 굵은 골재의 적용성을 방해하기 때문에 순환 굵은 골재의 활용성을 위해 골재 주변에 부착된 모르타르를 제거할 수 있는 추가적인 처리 방법이 필요하다고 보고된다.

이처럼 천연골재를 순환 굵은 골재로 치환율이 증가하였을 때 보통 콘크리트 대비 낮은 강도 발현을 보이기 때문에 초기 시공단계에 있어서 거꾸집이나 동바리 붕괴사고 등의 재해에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 순환 굵은 골재를 치환한 콘크리트의 안정성을 확보할 필요성이 있으며, 골재의 안정화 및 적정 치환율을 설정할 필요가 있다고 판단된다. 적정 치환율을 설정하기 위해서 기존에 연구 조사와 실험적인 연구의 병행을 지속해서 할 필요성이 있다.

순환 굵은 골재의 활용은 환경 및 경제 등에 상당한 이점을 제공할 수 있을 것으로 판단되며, Zheng et al.(2017)에 따르면 10~20 %의 재료 비용이 감소할 수 있다는 결과를 나타냈다. 이에 따라 순환 굵은 골재의 활용성을 증대시키기 위해 치환율에 따른 콘크리트 역학적 특성을 분석과 기존 연구자들의 연구 동향을 파악하여 추후 순환 굵은 골재 콘크리트가 건축물 적용하기 위한 적합한 치환율을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구의 목적은 천연골재를 순환 굵은 골재로 치환한 콘크리트의 안정성을 확보하기 위한 순환 굵은 골재 치환율에 따른 역학적 특성을 분석하여, 적합한 치환율을 도출하고자 한다.

## 2. 연구 계획 및 방법

### 2.1 연구 계획

본 연구는 순환 굵은 골재의 활용성 증대 및 효율적인 실험연구를 위해 기존 연구의 연구 동향 및 순환 굵은 골재 치환율에 따른 역학적 특성 등에 대한 자료를 수집할 필요가 있다고 판단된다. 이에 따라 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 최근 10년 동안 출간된 순환 굵은 골재 치환율과 관련된 논문을 수집하고 보통 및 순환 굵은 골재 콘크리트의 역학적 특성 비교를 위한 데이터 수집 논문을 선별하였다. 선별된 논문에서 수집할 수 있는 데이터를 분석 및 평가를 통해 순환 굵은 골재 콘크리트의 활용성 및 안정성을 높이기 위한 골재 치환비율을 설정하였다.

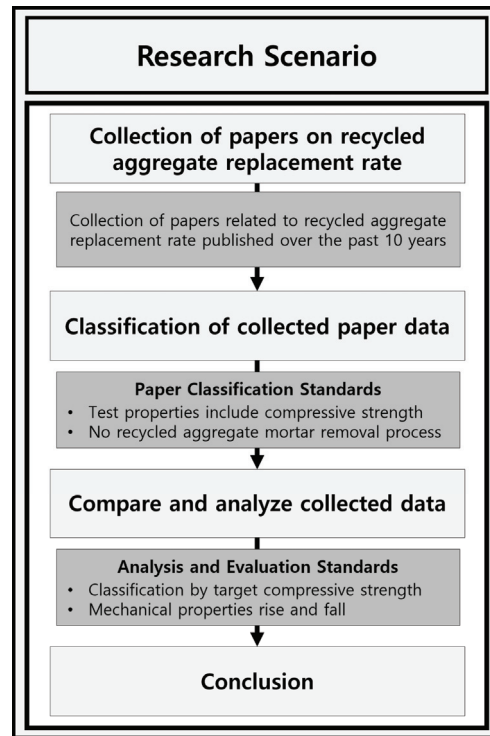


Fig. 2. Research scenario

### 2.2 연구 방법

순환 굵은 골재 콘크리트와 관련된 10년간 출간된 논문을 수집하였다. 폐콘크리트에서 발생하는 골재, 타일, 및 변기 등 다양한 순환 굵은 골재의 종류가 있지만, 그중 폐콘크리트에서 발생한 골재를 사용한 순환 굵은 골재 콘크리트 관련 논문을 분류하였다. 또한 순환 굵은 골재를 혼합한 콘크리트의 압축강도 평가 여부

Table 1. Analysis of existing research on recycled aggregate concrete

Specimen shape	Target strength	Coarse aggregate	Coarse aggregate density		Coarse aggregate water absorption		Coarse aggregate replacement rate	Admixture	Test properties	Ref.
			Natural	Recycled	Natural	Recycled				
Cube	40 MPa	Natural & recycled	2.6	2.3	0.6	4.4	0 %, 15 %, 30 %, 45 %, 60 %	FA	Compressive strength	Ismail and Ramli 2013
Cylinder	40 MPa, 60 MPa	Natural & recycled	2.7	2.2 ~ 2.3	1.52	4.7 ~ 7.8	0 %, 100 %	-	Compressive strength Splitting tensile strength Elastic modulus	Butler et al. 2013
Cylinder	40 MPa	Limestone natural & recycled	2.7	2.1	0.74	6.1	0 %, 50 %, 100 %	FA	Compressive strength Modulus of elasticity Tension strength	Knaack and Kurama 2014
Cylinder	35 MPa, 45 MPa	Natural & recycled	2.7	2.4	1.53	6.9	0 %, 20 %, 50 % 100 %	-	Compressive strength Flexural strength Elastic modulus Ultrasonic pulse velocity	Beltran et al. 2014
Cube	100 MPa	Natural & recycled	2.6	2.3 ~ 2.5	1.29	3.7 ~ 5.9	0 %, 20 %, 50 %, 100 %	-	Compressive strength Ultrasonic pulse velocity Flexural strength Splitting tensile strength Elastic modulus	Gonzalez-Corominas and Etxeberrian 2014
Cylinder	25 MPa, 30 MPa, 40 MPa	Virgin coarse & recycle	2.8	2.5	0.38	6.2	0 %, 50 %, 100 %	-	Compressive strength Split-cylinder tensile strength Freeze-thaw cycle resistance	Yildirim et al. 2015
Cube Cylinder	66 MPa, 78 MPa	Natural & recycled	2.7	2.4	0.5	7.4	0 %, 100 %	GGBFS, SF	Compressive strength Flexural strength Splitting tensile strength Elastic modulus	Gesoglu et al. 2015
Cube Cylinder	45 MPa, 65 MPa	Natural & recycled	2.6	2.4 ~ 2.5	1.1	3.2 ~ 5.5	0 %, 30 %, 45 %, 60 %, 80 %, 100 %	FA	Compressive strength Splitting tensile strength Elastic modulus Ultrasonic pulse velocity	Kou and Poon 2015
Cube Cylinder	100 MPa	Natural & recycled	2.6	2.3 ~ 2.5	1.93	3.7 ~ 5.9	0 %, 20 %, 50 %, 100 %	-	Compressive strength Elastic modulus	Gonzalez-Corominas and Etxeberrian 2016
Cylinder	28 MPa, 60 MPa	Natural & recycled	2.6 ~ 2.7	2.3 ~ 2.4	0.8 ~ 1.4	4.7 ~ 5.2	0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %	-	Compressive strength Splitting tensile strength Modulus of elasticity	Hamad and Dawi 2017
Cube	55 MPa	Crushed limestone gravels & recycled	2.6	2.4	1.4	5.0	0 %, 100 %	-	Compressive strength GWP results	Kurad et al. 2017
Cylinder	70 MPa	Natural & recycled	2.5	2.2 ~ 2.5	2.5	3.7 ~ 7.0	0 %, 50 %, 100 %	-	Compressive strength Splitting tensile strength Modulus of elasticity	Dimitriou et al. 2018
Cube Cylinder	50 MPa	Natural & recycled	2.6	2.4	1.7	5.4	0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %	SF	Compressive strength Ultrasonic pulse velocity Electrical resistivity Rapid chloride penetration test	Sasanipour et al. 2019
Cube Cylinder	50 MPa	Natural & recycled	2.6	2.4	1.7	5.4	0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %	SF	Compressive strength Ultrasonic pulse velocity Electrical resistivity Rapid chloride penetration test	Sasanipour and Aslani 2019
Cube Cylinder	60 MPa, 75 MPa, 80 MPa	Natural & recycled	2.6	2.4	1.7	5.4	100 %	SF	Compressive strength Ultrasonic pulse velocity Electrical resistivity Rapid chloride penetration test	Sasanipour and Aslani 2020

및 골재에 부착된 잔여 모르타르의 제거 여부를 통해 재분류를 진행하였다.

본 연구에서는 순환 굵은 골재 중 굵은 골재의 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화를 분석하기 위한 것이다. 이에 따라 순환 굵은 골재에 부착된 모르타르를 제거하는 처리공정을 거친 논문은 수집할 때 분류하여 목록에서 제거하였다. 본 연구에서 사용할 수 있는 논문 15개를 Table 10에 나타냈으며, 각 논문에 대한 데이터를 수집하고 분석하였다(Ismail and Ramli 2013; Butler et al. 2013; Knaack and Kurama 2014; Beltran et al. 2014; Gonzalez-Corominas Etxeberria 2014; Yildirim et al. 2015; Gesoglu et al. 2015; Kou and Poon 2015; Gonzalez-Corominas Etxeberria 2016; Kurad et al. 2017; Dimitriou et al. 2018; Sasanipour et al. 2019; Sasanipour and Aslani 2019; Sasanipour and Aslani 2020). 또한 골재의 물성을 확인하기 위해 보통 및 순환 굵은 골재의 밀도와 흡수율을 표에 표기하였으며, 수집된 논문에서 목표강도 그리고 측정항목 등을 표기하였다. 이에 따라 각 논문에서 설정한 W/C를 통해 데이터 분류를 진행하였지만, W/C이 동일하더라도 28일 강도가 상이한 결과를 나타냈기 때문에 목표강도에 따라 콘크리트의 역학적 특성 분류를 진행하였다. 또한 목표강도를 설정하지 않은 논문들에 대해서는 28일에도 달한 콘크리트의 강도를 통해 목표강도로 설정하여 분류를 진행하였다. 목표강도의 경우  $45 \pm 5$  MPa인 것과 55 MPa 이상인 것으로 분류하여 분석을 진행하였다.

### 3. 연구 결과

본 연구를 수행하기 위한 분석 방법의 경우 순환 굵은 골재를

치환하지 않은 보통 콘크리트의 역학적 특성을 100 %로 두고 순환 굵은 골재 콘크리트의 치환율에 따라 역학적 특성의 변화가 보통 콘크리트 대비 어느 정도 저하하는지 분석 및 평가를 진행하였다. 또한 본 연구를 수행하기 위해 순환 굵은 골재의 치환율이 증가할 수록 보통 콘크리트 대비 낮은 역학적 특성을 나타낼 것이라고 가설을 세웠다. 이에 따라 가설을 검증하기 위해 기존 연구의 데이터를 수집하여 분석을 수행하였으며, 순환 굵은 골재의 치환율에 대한 역학적 특성을 검토하여 적정 치환율을 제시하고자 한다. 또한 각 Fig에서 나타낸 RCA, NAC와 RAC의 약자는 순환 굵은 골재 (Recycled Concrete Aggregate : RCA), 보통 굵은 골재 콘크리트 (Natural coares Aggregate Concrete : NAC) 와 순환 굵은 골재 콘크리트(Recycled coarse Aggregate Concrete : RAC)이다.

#### 3.1 순환 굵은 골재 치환율에 따른 압축강도

Fig. 3(a)에는 연구의 데이터 중 목표강도  $45 \pm 5$  MPa인 콘크리트의 순환 굵은 골재 치환율이 증가함에 따라 압축강도의 변화를 나타냈다. Fig. 3(a)에서 보여지는 것처럼 일반적으로 순환 굵은 골재의 치환율이 증가할수록 보통 굵은 골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 압축강도를 나타내는 양상을 확인할 수 있다. 하지만 기존 연구 중 순환 굵은 골재의 치환율이 증가하였음에도 불구하고 보통 굵은 골재 콘크리트 대비 높은 압축강도를 나타낸 데이터가 일부 있었다. 일부 압축강도 값이 증가한 데이터 중 순환 굵은 골재 치환율 20 %인 콘크리트에서 압축강도 값이 보통 콘크리트 대비 2.0 ~ 2.8 % 높은 압축강도를 나타냈으며, 치환율 50 %인 콘크리트에서는 20 %와 유사하게 1.2 ~ 3.0 % 높은 압축강도를 나타냈다. 또한 100 % 치환한 콘크리트의 경우 보통 콘크리트와

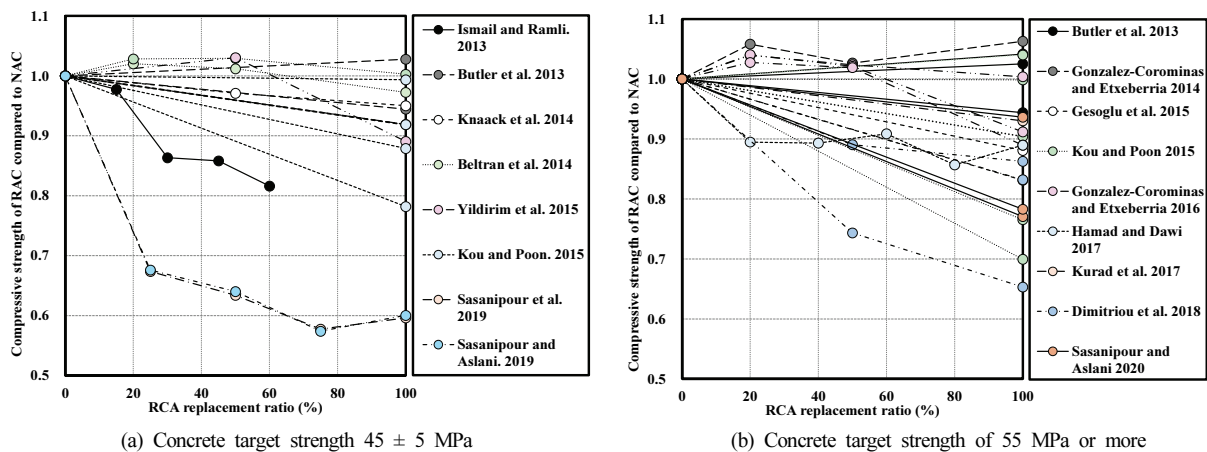


Fig. 3. Classification by concrete target compressive strength

거의 유사한 압축강도를 나타낸 시험체도 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3(b)에는 목표강도 55 MPa 이상인 콘크리트에 대한 데이터를 수집하여 순환 굵은 골재 치환율에 따른 압축강도 변화를 나타냈다. Fig. 3(b)에서도 Fig. 3(a)와 유사하게 일부 값을 제외하고 치환율이 증가함에 따라 보통골재 콘크리트에 비해 낮은 압축강도를 나타냈다. 또한 일부 증가한 값 중 순환 굵은 골재 치환율 20 %인 콘크리트가 보통 콘크리트 대비 5.8 % 큰 값을 나타냈으며, 치환율이 50 %인 콘크리트는 20 %보다는 낮은 2.7 %의 값을 나타냈다. 순환 굵은 골재 치환율 100 %에서는 일부 데이터가 보통 콘크리트 대비 4.2 ~ 6.3 % 상회하였다.

각 목표강도에 따라 분류를 진행하였을 때 치환율이 증가했음에도 불구하고 압축강도가 증가하는 경향이 일부 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 치환율이 증가했을 때 압축강도의 값이 하강하는 것과 일부 상승하는 것을 재분류하여 Fig. 4에 나타내었으며, 순환 굵은 골재를 치환하였을 때 압축강도가 높게 나타나는 원인에 대해 분석하기 위해 분류를 진행하였다.

Fig. 4(a)에서는 순환 굵은 골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 낮아지는 데이터만 분류하여 나타낸 것이다. 이렇게 낮아지는 경향은 수집논문 15개 중 11개의 논문에서 나타났다. 이러한 경향은 순환 굵은 골재에 붙어있는 모르타르로 인해 경량골재와 유사한 낮은 밀도와 다공성 및 흡수성 등의 특징 때문이라고 판단되며, 순환 굵은 골재 표면에 부착된 잔여 모르타르로 인해 모르타르의 부착력이 저해하였다고 판단된다. Poon et al.(2004)에 따르면 보통 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 SEM(Scanning Electron Microscope)을 확인했을 때 골재의 형태에 따라 ITZ가 잘 형성되지만, 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트

의 경우 ITZ 영역이 주로 느슨하고 다공성이 많다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 다공성으로 인해 천연골재에 비해 밀도가 낮아지고 순환 굵은 골재에 부착된 모르타르로 인해 Table 1에서 나타난 것처럼 천연골재보다 적게는 약 2배 많게는 약 14배 더 높은 흡수율을 가지게 된다. 이에 따라 수화반응을 거친 후 경화가 진행되는 과정에서 수분을 흡수하는 순환 굵은 골재의 특성 때문에 보통 콘크리트 대비 낮은 압축강도가 나오는 것이라 판단된다 (Ismail and Ramli 2013; Kisku et al. 2017). 이에 따라 Fig. 4(a)에서 보인 것처럼 순환 굵은 골재 치환율이 증가할수록 보통 콘크리트에 비하여 낮은 압축강도가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)에서는 천연골재를 순환 굵은 골재로 치환하였을 때 보통 콘크리트 대비 일부 상승한 결과를 보여준 데이터를 분류하여 나타낸 것이다. Table 1에서 나타난 것처럼 콘크리트 압축강도에 도움을 주는 혼화 재료를 혼입한 콘크리트의 경우 Fig. 4(b)에 1개의 논문을 제외하고 속하지 않았으며, 이것은 순환 굵은 골재 콘크리트에 혼화 재료를 혼입하는 것이 보통 콘크리트에 적용하는 것보다 강도 발현에 있어 효과가 저조하기 때문으로 판단된다. 또한 콘크리트 배합 시 골재가 약 70 % 차지하기 때문에 골재의 영향이 콘크리트 역학적 특성에 대한 영향이 더 크기 때문으로 판단된다(Yang and Huang 1996).

Fig. 4(b)에서 나타낸 데이터의 논문을 검토했을 때 보통 콘크리트에서 설정된 목표강도에 도달하기 위해 순환 굵은 골재 치환비율에 따라 다른 물의 양을 적용하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 순환 굵은 골재를 7일 동안 100 % 포화상태로 하거나 배합 시 순환 굵은 골재의 흡수율을 고려하여 순환 굵은 골재 치환율이 증가할수록 높은 W/C로 적용하였다. 순환 굵은 골재 치환율 20 %인 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 2.0 ~ 5.8 %까지 상승하였

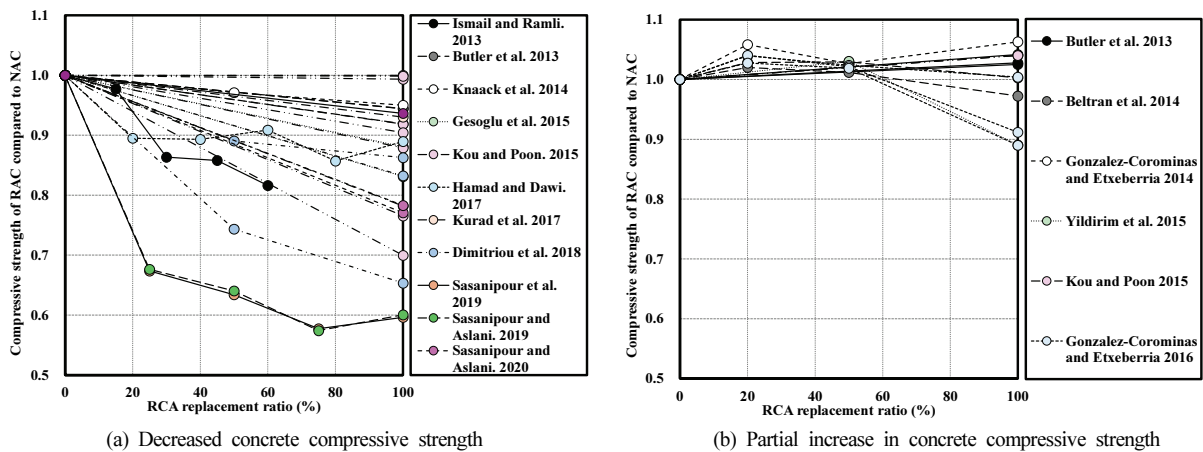


Fig. 4. Classification of concrete compressive strength trends according to recycled aggregate replacement rate

으며, 50 % 치환한 콘크리트는 1.1 ~ 3.0 %까지 상승하였다. 100 % 치환한 콘크리트는 일부 데이터에서 0.3 ~ 6.3 %까지 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 일부는 순환 굵은 골재 콘크리트가 보통 콘크리트 대비 낮은 압축강도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 순환 굵은 골재의 높은 흡수율로 인해 모르타르의 W/C를 낮추는 효과가 발생하면서 높은 압축강도의 값이 나왔다고 판단된다(Poon et al, 2004; Etxeberria et al, 2006). 하지만 이러한 경우는 극히 드물며, 대체로 순환 굵은 골재의 치환율이 증가할수록 압축강도의 값이 낮아지는 것으로 확인되었다.

W/C에 더 효과적으로 강도 상승이 되는 원인은 Guneyisi et al.(2014)에 따르면 보통 콘크리트와 순환 굵은 골재 콘크리트의 W/C를 동일하게 하였을 때 순환 굵은 골재 콘크리트에서 순환 굵은 골재가 수분을 흡수하여 다양한 공극 및 잘 형성되지 않은 수화생성물을 제공하기 때문이라고 보고된다. 이러한 결과를 통해 기존 모르타르와 새로운 모르타르 사이에 형성된 ITZ의 특성이 약하기 때문에 압축강도 개선을 위해서 골재의 흡수율을 고려하여 물을 추가해야 한다고 판단된다. 또한 실제 건축물에 적용하기 위해 순환 굵은 골재의 흡수율을 고려하여 적정 치환율에 관한 검토 후 제시될 필요가 있다고 판단된다.

### 3.2 순환 굵은 골재 치환율에 따른 인장강도

Fig. 5에서는 순환 굵은 골재 치환율에 따른 인장강도 변화를 나타냈으며, 순환 굵은 골재를 20 %, 50 % 와 100%로 치환한 콘크리트 인장강도 값 중 일부가 보통 콘크리트 대비 11.3 %, 9.9 %와 10.4 % 큰 값을 나타냈다. 이러한 경향은 순환 굵은 골재 콘크리트의 ITZ의 미세구조가 개선되면서, 골재에 부착된 모르타르와 새로운 모르타르의 결합력이 향상되었기 때문으로 판단된다(Duan

and Poon 2014). 하지만 대체로 순환 굵은 골재를 치환하였을 경우 보통 콘크리트 대비 밀도는 값을 보이며, 압축강도와 유사한 원인으로 골재 주변 모르타르의 수분 흡수로 인해 낮은 인장강도가 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 경향은 보통골재에서 형성된 ITZ보다 순환 굵은 골재에서 형성된 ITZ에서의 신규 모르타르와의 결합력이 저하되었기 때문에 낮은 인장강도를 나타냈다고 판단된다.

### 3.3 순환 굵은 골재 치환율에 따른 탄성계수

Fig. 6은 순환 굵은 골재 치환율에 따른 콘크리트의 탄성계수 변화를 나타냈다. 인장강도의 경우 보통 콘크리트에 비해 높은 인장강도를 나타내는 순환 굵은 골재 콘크리트가 다소 있었지만, 탄성계수의 경우 인장강도에 비해 순환 굵은 골재 치환율이 증가함에 따라 더 낮은 탄성계수를 나타냈다.

콘크리트의 탄성계수는 골재의 탄성계수가 높을수록 높은 탄성계수의 값을 나타내며, 또한 골재의 탄성도는 밀도가 낮을수록 낮은 탄성도를 보인다. 순환 굵은 골재에 부착된 모르타르의 양이 많을수록 모르타르가 골재보다 밀도가 낮고 다공성이기 때문에 천연골재에 비해 순환 굵은 골재가 더 낮은 탄성도를 갖는다. 이에 따라 탄성계수가 치환율이 증가할수록 낮은 탄성계수를 가지게 되었다고 판단된다(Neville 1997).

보통 콘크리트보다 8.4 % 높은 탄성계수를 나타낸 값이 나타난 원인은 Matias et al.(2013)에 따르면 굵은 골재의 모양과 질감에 따라 콘크리트 강도에 영향을 미친다는 결과를 제시했다. 이에 따라 순환 굵은 골재의 표면이 모르타르로 인해 거칠고 각져있기 때문에 새로운 모르타르가 천연골재보다 순환 굵은 골재에 더 부착이 잘되었기 때문에 높은 탄성계수를 보였다고 판단된다. 이

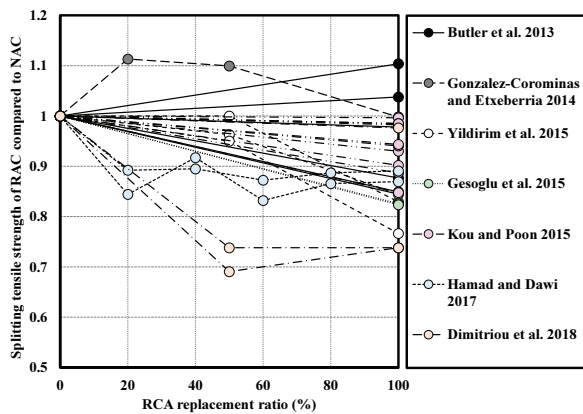


Fig. 5. Splitting tensile strength of normal and recycled aggregate concrete

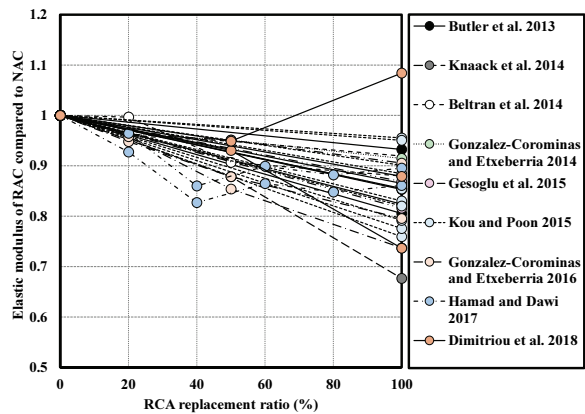


Fig. 6. Elastic modulus of normal and recycled aggregate concrete

한 경향은 수집한 데이터의 극히 일부에서 나타났으며, 일반적으로 순환 굵은 골재를 혼입한 콘크리트가 낮은 탄성계수를 갖게 되었다고 보고된다. 하지만 압축강도와 인장강도에서 나타난 결과와 상이하게 탄성계수는 치환율이 증가할수록 탄성계수가 줄어드는 경향을 확연히 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 순환 굵은 골재에 부착된 잔여 모르타르로 인해 탄성계수에 직접적으로 영향을 미치는 밀도를 낮추는 영향으로 굵은 골재의 표면적이 넓어짐에 따라 ITZ의 결합력이 낮아진다. 이에 따라 응력 전달이 불균일하게 되며, 치환율이 증가함에 따라 탄성계수가 대체로 낮아지는 경향을 나타낸다고 판단된다(Poon et al. 2004; Gonzalez-Corominas and Etxeberria 2014).

#### 4. 순환 굵은 골재 콘크리트 적용성 고찰

순환 굵은 골재의 경우 보통골재에 비해 밀도가 낮고, 흡수율이 높아 일반적으로 보통 콘크리트에 비해 순환 굵은 골재 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 그리고 탄성계수 등 낮은 역학적 특성을 나타낸다. 이에 따라 KS F 2527에서는 밀도, 흡수율, 안정성 및 마모율 등 골재의 다양한 물리적 성질에 대한 기준을 명시하고 있지만, 순환 굵은 골재 치환율에 대한 기준을 가지고 있지 않다. 이에 따라 순환 굵은 골재의 적용성 및 활용성을 높이기 위해서 골재 치환율에 대한 고려해볼 필요가 있다고 판단된다(Mairer and Durham 2012). 또한 Etxeberria et al.(2007)과 Xia and Zhao(2024)에 따르면 기존 순환 굵은 골재를 사용한 콘크리트의 경우 W/C를 동일하게 설정하고, 시멘트의 양을 상이하게 했을 때 시멘트량이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 W/C를 상이하게 한 후 시멘트량을 동일하게 했을 때 점차 W/C 이 낮은 콘크리트가 높은 압축강도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 새로운 모르타르의 물성에 따른 콘크리트 영향은 보통 콘크리트와 순환 굵은 골재 콘크리트가 유사한 경향을 나타내지만, 순환 굵은 골재 콘크리트의 경우 골재 표면에 부착된 잔여 모르타르 함량이 역학적 특성의 변화에 지배적인 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 순환 굵은 골재 활용성을 증대시키기 위한 치환율에 관한 연구가 지속해서 진행되어야 하며, 적정 치환율에 대한 설정이 필요하다고 판단된다.

기존 연구 동향 및 결과를 분석했을 때 순환 굵은 골재를 100 % 치환한 콘크리트의 경우 보통 콘크리트 대비 압축강도는 -40.0 ~ 6.3 %의 값을 나타냈으며, 인장강도의 경우 -26.2 ~ 10.4 %의 값을 나타냈다. 또한 탄성계수의 경우 -26.4 ~ 8.4 %의 값을 나타냈으며, 대체로 순환 굵은 골재를 100 % 치환한 콘크리트의 경우

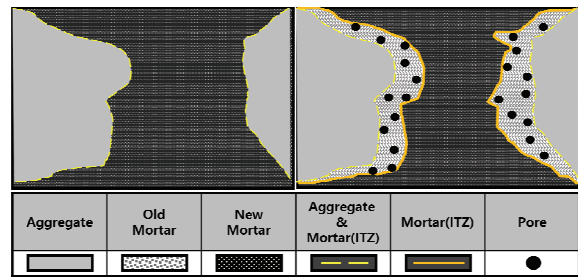


Fig. 7. ITZ schematic diagram of normal and recycled aggregate concrete

역학적 특성이 낮다는 것을 확인할 수 있다. 순환 굵은 골재를 50 % 치환한 콘크리트의 경우 보통 콘크리트 대비 압축강도는 -36.0 ~ 3.0 %의 값을 나타냈으며, 인장강도의 경우 -30.9 ~ 9.9 %의 값을 나타냈다. 또한 탄성계수의 경우 -14.6 ~ -4.9 %의 값을 나타냈으며, 순환 굵은 골재를 50 % 치환한 콘크리트가 100 % 치환한 콘크리트보다 높은 역학적 특성을 나타냈다. 이러한 경향은 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 순환 굵은 골재 주변에 부착된 모르타르로 인해 ITZ가 느슨해지고 기공 수가 증가하고 기공의 크기도 증가하게 된다. 이에 따라 보통골재 콘크리트에 비해 낮은 역학적 특성이 보이며, 순환 굵은 골재 사용하기 위한 다양한 실험연구가 필요하다고 판단된다(Tian et al. 2021).

본 연구에서는 골재에 모르타르를 제거하거나 활성화하는 등 콘크리트에 역학적 특성을 높이기 위한 골재 처리공정을 거치지 않은 논문을 수집하였다. 이에 따라 처리공정을 거치지 않은 순환 굵은 골재를 콘크리트 배합 시 사용하면 보통 콘크리트의 역학적 특성 80 % 이상이 나타날 수 있는 순환 굵은 골재 치환율 50 % 이하로 한정해야 한다고 판단된다. 또한 순환 굵은 골재를 사용하면 순환 굵은 골재의 흡수율을 측정하여 목표강도를 위해 설정하는 W/C에 추가로 물을 혼입하여야 한다(Zhao et al. 2013; Rahal 2007).

#### 5. 결론

본 연구에서는 순환 굵은 골재를 치환한 콘크리트의 역학적 특성을 검토하기 위해 기존 연구자들의 연구 자료를 수집하여 연구 동향 및 결과를 분석하였다. 순환 굵은 골재의 적용성 확대를 위해서 KS F 2527에 언급되지 않은 순환 굵은 골재 치환율에 대한 검토가 필요하다고 판단되기 때문에 순환 굵은 골재 콘크리트의 역학적 특성을 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 순환 굵은 골재 콘크리트의 경우 보통 콘크리트에 비해 치환

율이 증가할수록 대체적으로 낮은 압축강도를 나타냈으나, 일부 보통골재 콘크리트 대비 높은 압축강도를 나타낸 데이터가 있었다. 일부 증가한 값은 W/C를 동일한 조건에서 배합했을 때 순환 굵은 골재가 물을 흡수하여 모르타르의 W/C를 낮춰졌기 때문이라 판단된다.

- 순환 굵은 골재 콘크리트의 인장강도의 경우 보통 콘크리트에 비해 일부를 제외하고 낮은 인장강도의 값을 나타냈으며, 이것은 순환 굵은 골재 외부에 부착된 잔여 모르타르가 수분을 흡수하기 때문에 콘크리트 강도 발현에 영향을 미쳤다고 판단된다.
- 탄성계수의 경우 콘크리트 재료의 탄성도에 따라 값이 달라지며, 탄성도는 재료의 밀도가 낮을수록 낮은 값을 나타냈다. 이에 따라 순환 굵은 골재에 부착된 잔여 모르타르로 인해 밀도가 저하되고 다공성으로 인해 순환 굵은 골재의 치환율이 높을수록 낮은 탄성계수를 나타냈다.
- 순환 굵은 골재 콘크리트는 천연골재를 100 % 치환하였을 경우 보통 콘크리트 대비 평균 30 % 내외로 낮은 역학적 특성을 나타낸다. 따라서 순환 굵은 골재의 잔여 모르타르 제거 및 활성화 공정을 거치지 않았을 경우 보통 콘크리트 역학적 특성의 80 %의 값을 가질 수 있도록 순환 굵은 골재의 치환율을 50 % 이하로 설정하여 배합해야 한다고 판단된다. 또한 골재의 흡수율이 높기 때문에 고려하여 흡수율을 고려하여 콘크리트 배합 시 추가적인 물을 혼입하여야 한다.
- 본 연구에서는 순환 굵은 골재의 치환율에 관한 기존 연구를 조사하고 분석하였으며, 추후 순환 굵은 골재에 부착된 모르타르 제거 및 처리 등 다양한 공정 중 효율적이고 실현할 수 있는 공정을 분석하여 순환 굵은 골재의 활용성을 높일 필요가 있다고 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

This study was supported by the Technology development Program (S3270705) funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, Korea) & the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1073333).

## References

- Maier, P.L., Durham, S.A. (2012). Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures, *Construction and Building Materials*, **29**, 428–437.
- Beltran, M.G., Barbudo, A., Agrela, F., Galvin, A.P., Jimenez, J.R. (2014). Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths, *Journal of Cleaner Production*, **79**, 124–133.
- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L. (2013). Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength, *Construction and Building Materials*, **47**, 1292–1301.
- Dimitriou, G., Savva, P., Petrou, M.F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **158**, 228–235.
- Duan, Z.H., Poon, C.S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials & Design*, **58**, 19–29.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A. (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, **58(10)**, 683–690.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, **37(5)**, 735–742.
- Gesoglu, M., Guneyisi, E., Oz, H.O., Taha, I., Yasemin, M.T. (2015). Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, **98**, 334–344.
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **52**, 227–235.
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. (2016). Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete, *Construction and Building Materials*, **115**, 32–41.
- Guneyisi, E., Gesoglu, M., Algin, Z., Yazici, H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, **64**, 172–183.
- Hamad, B.S., Dawi, A.H. (2017). Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates, *Case Studies in Construction*



- Materials, **7**, 228–239.
- Ismail, S., Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications, *Construction and Building Materials*, **44**, 464–476.
- Ismail, S., Ramli, M. (2014). Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, **68**, 726–739.
- KEC. (2023). National Waste Generation and Processing Status in 2022, Korea Environment Corporation, in Korea, 1–55.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S.K., Nayak, S., Dutta, S.C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Construction and Building Materials*, **131**, 721–740.
- Knaack, A.M., Kurama, Y.C. (2014). Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates, *Cement and Concrete Research*, **141(3)**, B4014009.
- Kou, S.C., Poon, C.S. (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **77**, 501–508.
- Kurad, R., Silvestre, J., de Brito, J., Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete, *Journal of Cleaner Production*, **166**, 485–502.
- Matias, D., De Brito, J., Rosa, A., Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - influence of the use of superplasticizers, *Construction and Building Materials*, **44**, 101–109.
- Nebille, A. (1997). Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete, *ACI Materials Journal*, **94(1)**, 71–74.
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, **18(6)**, 461–468.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, *Building and environment*, **42(1)**, 407–415.
- Sasanipour, H., Aslani, F. (2019). Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, **228**, 117054.
- Sasanipour, H., Aslani, F. (2020). Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, **264**, 120203.
- Sasanipour, H., Aslani, F., Taherinezhad, J. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, **227**, 116598.
- Tam, V.W., Gao, X.F., Tam, C.M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, **35(6)**, 1195–1203.
- Thomas, c., Setien, J., Polanco, J.A., Alaejos, P., De Juan, M.S. (2013). Durability of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **40**, 1054–1065.
- Tian, Y., Jiang, J., Wang, S., Yang, T., Qi, L., Geng, J. (2021). The mechanical and interfacial properties of concrete prepared by recycled aggregates with chloride corrosion media, *Construction and Building Materials*, **282**, 122653.
- Xia, G., Zhao, Y. (2024). Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content, *Case Studies in Construction Materials*, **20**, e03262.
- Yang, C.C., Huang, R. (1996). A two-phase model for predicting the compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, **26(10)**, 1567–1577.
- Yidirim, S.T., Meyer, C., Herfellner, S. (2015). Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, **91**, 288–296.
- Zhao, Y., Zeng, W., Zhang, H. (2017). Properties of recycled aggregate concrete with different water control methods, *Construction and Building Materials*, **152**, 539–546.
- Zheng, L., Wu, H., Zhang, H., Duan, H., Wang, J., Jiang, W., Dong, B., Liu, G., Zuo, J., Song, Q. (2017). Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China, *Construction and Building Materials*, **136**, 405–413.

### 순환 굵은 골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화 검토\_사례 연구

본 연구에서 순환 굵은 골재를 콘크리트에 적용하는 데 있어 치환율을 고려할 필요가 있다고 판단되어 기존 연구 동향 및 결과에 대한 자료를 수집하고 순환 굵은 골재 치환율에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 분석하였다. 순환 굵은 골재에 대한 자료를 수집하는 데 있어 콘크리트 측정항목 중 압축강도의 있는 것과 및 순환 굵은 골재에 부착된 잔여 모르타르의 제거 등의 공정을 거치지 않은 자료를 수집하였다. 순환 굵은 골재를 50 %와 100 % 치환한 콘크리트의 경우 보통 콘크리트 대비 역학적 특성이 평균적으로 각각 -36.0 ~ 9.9 %와 -40.0 ~ 10.4 % 밑돌거나 상회하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 배합 시 흡수율을 고려하여 추가적인 물을 혼입해야 하며, 보통 콘크리트 대비 80 % 이상의 역학적 특성이 나오는 순환 굵은 골재 치환율을 50 % 이하로 하여야 한다고 판단된다.