

## 방사형 회전이 추가된 임팩트 크러셔를 이용한 콘크리트용 순환굵은골재 품질향상 및 검증 연구

# A Study on Quality Improvement and Verification of Recycled Coarse Aggregate for Concrete Using an Impact Crusher with Radial Rotation

전덕우<sup>1</sup> · 김용성<sup>2\*</sup> · 전찬수<sup>3</sup> · 최원영<sup>4</sup> · 조원익<sup>5</sup>

Duk-Woo Jeon<sup>1</sup> · Yong-Seong Kim<sup>2\*</sup> · Chan-Soo Jeon<sup>3</sup> · Won-Young Choi<sup>4</sup> · Won-Ig Cho<sup>5</sup>

(Received October 8, 2021 / Revised June 3, 2022 / Accepted June 6, 2022)

The purpose of this study is to develop an impact crusher with a radial rotating plate installed at the bottom, which is a shock absorber that can produce high-quality recycled coarse aggregate for concrete and to verify the effect of improving the quality performance of recycled coarse aggregate and its applicability through concrete tests. As a result, it showed improved quality in all items such as absolute dry density, absorption rate, abrasion resistance, Particle shape judgment rate, amount lost in the 0.08 mm sieve passing test, alkali aggregate reaction, clay mass, stability, and impurity content, and it was found to meet the criteria of recycled aggregate quality standards. In addition, the air volume and slump of concrete to which recycled coarse aggregate is applied meet all domestic standards. According to the test results of the compressive strength characteristics by age of concrete according to the mixing ratio of the recycled coarse aggregate, it was confirmed that the mixing ratio of the recycled coarse aggregate was applicable up to 60 %.

**키워드** : 순환골재, 건설폐기물, 콘크리트, 재활용, 파쇄기, 방사형 회전판, 임팩트 크러셔

**Keywords** : Recycled aggregate, Recycling construction, Concrete, Recycling, Crusher, Radial turn plate, Impact crusher

## 1. 서론

정부에서는 순환골재의 의무사용량을 확대하는 등의 노력을 통해 순환골재의 사용 활성화를 추진하고 있으나 순환골재에 대한 사회적 인식 부족과 순환골재 콘크리트의 활용을 위한 실질적 연구 부족, 균질하지 못한 순환골재의 품질 등으로 인하여 아직까지도 성토 및 복토, 되메우기, 뒷채움용 등 비교적 저품질의 용도로만 사용되고 있다(Jang et al, 2009; Jeon et al, 2009; Lee and Shim 2010).

그러나, 일부 순환골재 혼입에 따른 순환골재 콘크리트의 물리적 성능이 확보되기도 하고 순환골재 콘크리트를 힘 부재로 사용할 경우 순환골재 100 % 혼입에도 현행 철근콘크리트 설계기준을

만족하는 등 콘크리트 구조물에 대한 순환골재의 이용가능성을 예상해 볼 수 있다(Song et al, 2009).

순환골재의 활성화를 위해서는 정부 정책·제도뿐만 아니라, 순환골재의 특성 및 순환골재의 구조적 성능 규명, 그리고 이러한 성능을 만족하며 대량 생산 가능한 기술개발과 관련한 연구가 뒷받침 되어야 한다(Song et al, 2009).

기존의 순환골재 생산 기술은 너무 큰 충격량과 충돌에너지를 이용함에 따라 다양한 골재 강도와 계면 특성을 갖는 폐콘크리트로부터 순환골재를 생산하는 데는 적합하지 않다.

본 연구에서는 폐콘크리트가 갖는 다양한 강도와 계면특성을 고려하여 고품질의 콘크리트용 순환골재를 생산할 수 있는 타격 완충

\* Corresponding author E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

<sup>1</sup>강원대학교 지역건설공학과 박사과정 수료 (Kangwon National University, Kangwon-do, 24341, Korea)

<sup>2</sup>강원대학교 지역건설공학과 교수 (Kangwon National University, Kangwon-do, 24341, Korea)

<sup>3</sup>한국건설기술연구원 건설시험인증본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

<sup>4</sup>한국건설기술연구원 건설시험인증본부 전임연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

<sup>5</sup>금강개발 기술연구소 연구소장 (R&D Center, Kumkang Development Limited Partnership, Kangwon-do, 26356, Korea)

장치인 방사형 회전판을 하단에 설치한 임팩트 크러셔를 개발하고 이를 이용하여 생산한 순환 굵은골재의 품질성능 향상 효과를 확인하였다. 또한, 순환골재 콘크리트 물리적 성능 실험을 통해 상기의 생산 기술이 콘크리트용 순환골재의 생산에 적합한지 검증하였다.

## 2. 방사형 회전판이 추가된 임팩트 크러셔

### 2.1 기술 개요

순환굵은골재를 생산하기 위한 기존 기술들은 주로 박리장치, 복합크러셔, 콘크러셔, 임팩트크러셔 등이 있다.

박리장치는 파쇄 에너지가 작아 효율이 낮아 모르타르 덩어리와 골재의 파쇄에 부적합하다. 복합 크러셔는 2개 이상의 파쇄 기구를 이용하는 것이나 입자별 구성과 계면의 강도특성을 고려하기에는 어려움이 있다. 콘크러셔는 박리와 파쇄 효과는 있으나 순환굵은골재 생산 시 혼입된 모르타르 덩어리의 파쇄가 어렵다. 임팩트 크러셔는 충돌, 충돌+박리의 파쇄특성 등을 이용하는 것으로 임팩트 크러셔에서 동일한 파쇄기구와 파쇄에너지가 각각의 파쇄기구에서 발생하도록 한 것이며, 파쇄 된 모르타르 덩어리와 골재에 부착된 큰 모르타르의 파쇄는 가능하나 파쇄 후 골재에 남은 모르타르 찌꺼기를 제거하는데 한계가 있다.

따라서, 비교적 고품질이 요구되는 콘크리트용 순환굵은골재를 생산하기 위해서는 각기 다른 충돌기구와 충돌 에너지를 갖는 기술이 필요하다.

한편, 골재 원석은 주로 강도가 약 50~200 MPa 로 높은 충돌 에너지를 필요로 하지만 그 외의 계면의 경우에는 5~40 MPa의 낮은 충돌에너지를 필요로 한다. 순환골재는 굵은 입자와 잔 입자가 혼합되어 있는 것으로 이중 굵은 입자는 모르타르와 페이스트가 부착된 골재덩어리로 너무 큰 충돌에너지를 가하면 골재가 파괴 될 뿐 표면에 부착된 모르타르나 페이스트를 제거하는 데 비효율적이다. 즉, 모르타르와 페이스트가 효율적으로 제거 된 골재 생산을 위해서는 충돌에너지가 큰 임팩트 크러셔를 통과하더라도 이 충격을 완충시키는 효율적인 방법이 필요하다.

본 연구에 적용된 상단 수직형 임팩트 크러셔는 고속 회전로터에 의해 1,924 - 8,130 joule의 높은 충돌에너지로 폐콘크리트의 골재 모암과 모르타르 덩어리를 파쇄하는 성능을 갖고, 하단의 방사형 회전판은 264 - 4,950 joule의 상대적으로 낮은 완충 충돌과 타격에너지로 부착 모르타르와 시멘트 페이스트를 파쇄 제거하는 성능을 갖는다.

본 연구에 적용된 기술을 설치한 현장에서는 죠크러셔 및 더블죠 크러셔 등을 통한 1차 및 2차 파쇄, 콘크러셔에 의한 3차 파쇄, 그리고

각각 단계별 파쇄 후 입도별로 골재를 선별하기 위한 스크린을 거친 후 순환굵은골재 생산을 위한 단계로 4차 파쇄 공정에 적용하였다.

본 연구에 적용된 기술은 상기와 같은 순환골재의 강도 및 계면 특성을 고려한 다중 충돌기구를 갖는 수직형 임팩트 크러셔로, Fig. 1과 같이 ①로 투입되는 골재가 ②→③→④ 순으로 수직형 임팩트 크러셔의 원심력에 의한 충돌이 일어나며 높은 충돌에너지를 통해 큰 골재를 파쇄하고, 골재에 부착된 큰 덩어리의 모르타르를 제거하는 구성을 지니고 있다. ⑤→⑥으로 이어지는 2차 충돌은 방사형 회전판에 의한 완충 타격과 완충 충돌로 충격에너지를 낮추어 1차 파쇄 후 골재에 붙어있는 모르타르 잔재물을 제거한다.

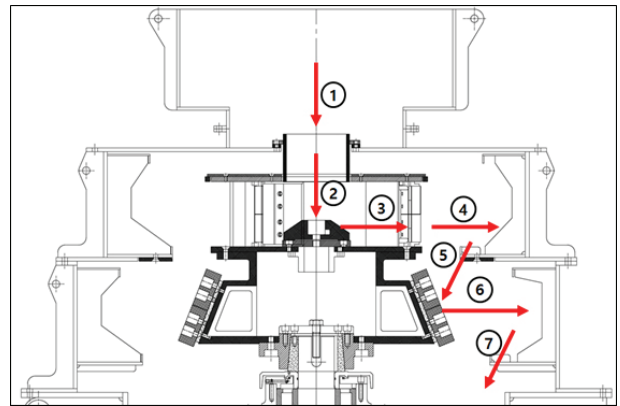


Fig. 1. Formal diagram of the developed Impact crusher

Table 1. Configuration and features

No	Component	Function
1	Hopper	Aggregate storage transferred from cone crusher
2	Feeder spot liner	A passage that transports recycled aggregate into the crusher
3	Rotor tip	A device that directly impacts the aggregate discharged by the spray cone on the aggregate in a high-speed rotational motion.
4	Top impact rotor	Top vertical impact crusher rotor
5	Spray cone	Conical part that sprays aggregate by centrifugal force
6, 7	Radial turn plate	Bottom radial swivel
8, 9	Top and bottom deadstock plates	A device in which recycled aggregate forms deadstock by rock & rock action
10, 11	Drive shaft and body pulley	A device that transmits the driving force of the motor to the crusher body

### 2.2 시뮬레이션을 통한 기술 평가

본 연구에서는 Fig. 2를 통해 나타낸 바와 같이 다물체 동역학 (multi-body dynamics) 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 분석을 실시하여 본 연구에서 활용된 기술의 성능을 사전 평가하고자 하였다. 해석에 사용한 소프트웨어로는 Siemens NX Motion라는 프로그램을 사용하였으며, 계산된 값은 1/1,000초 단위로 계산하였다.

상단의 수직형 임팩트 크러셔와 하단의 방사형 회전판에서의 주된 운동 작용은 부분별로 3가지와 4가지의 Case로 구분할 수 있어 이를 각각 구분하여 해석하였으며, 각 케이스별로 충돌에너지와 충격량을 해석하여 설명한 결과는 Table 2와 같이 나타났다.

상단의 수직형 임팩트 크러셔는 고속 회전 로터에 의해 1,924~8,180 joule의 충돌에너지를 나타내며 이는 비교적 높은 충돌에너지로 폐콘크리트를 구성하는 골재와 모르타르 덩어리를 파쇄하는 성능을 갖는 것으로 확인되었으며, 하단의 방사형 회전판은 264~4,950 joule의 충돌에너지를 나타냄으로써 상대적으로 낮은 충격에너지로 충돌을 완충 역할을 하면서 골재에 부착된 시멘트 모르타르와 페이스트를 효율적으로 제거하는 성능을 나타내었다.

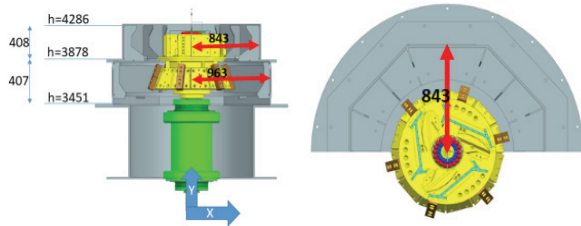


Fig. 2. 3D modeling

### 2.3 페이스트와 미립분 제거 성능 확인

방사형 회전판이 추가된 임팩트 크러셔를 이용하여 생산된 콘크리트용 순환골은골재의 모르타르와 시멘트 페이스트 및 미립분의 제거 성능을 확인하기 위하여 기술의 적용 전과 후에 대한 순환골재의 SEM 분석을 실시하였다.

그 결과, Table 3과 같이 부착된 페이스트와 미립분이 제거되고, 조직이 보다 치밀한 형태를 지닌 순환골은골재가 생산되었음을 확인하였다.

Table 3. SEM analysis results

Contents	Before passing	After passing
Microscopy (10x magnification)		
SEM imaging (200 μm)		
SEM imaging (100 μm)		

Table 2. Analytical results (base on aggregate of 1 kg, m=1)

Part	Case	The main action of the impact crusher by simulation	Analytical results	
			Impact energy (joule)	Amount of impact (kg · m/sec)
Vertical impact crusher at the top	Case 1	Transferred along the guide without internal collision with distribution plate and impact crush chamber wall.	3,730	64
	Case 2	After an internal collision with the distribution plate, it accelerates along the guide to double impact crush chamber wall.	8,180	114
	Case 3	After an internal collision with distribution plate, it is released at low speed and has a double impact on the wall of chamber.	1,924	22
Radial rotating plate at bottom	Case 1	Collision relief with radial impact on the top or slope of the paddle.	373	17.5
	Case 2	Collision relief(upper and lower paddle) in the direction of circumference tangent to the side of the paddle.	2,099	64.8
	Case 3		4,950	99.5
	Case 4	Colliding the wall of the rotor without any impact with the paddle.	264	14.3

Table 4. Test items and methods for recycled aggregates

Test items	Quality standards	Test methods	
Particle size distribution	-	KS F 2502	
Density	2.5 or more	KS F 2504	
Absorption rate	3.0 or less		
Abrasion	40 or less	KS F 2508	
Particle shape judgment rate	55 or more	KS F 2527	
0.08 mm sieve amount	1.0 or less	KS F 2511	
Alkali aggregate reaction	Harmless	KS F 2546	
Clay lump	0.2 or less	KS F 2512	
Stability	12 or less	KS F 2507	
Impurities content	Organic	1.0 or less (volume)	KS F 2576
	Inorganic	1.0 or less (mass)	

### 3. 순환굵은골재의 품질 향상 실험

#### 3.1 실험방법

본 연구에 적용한 기술을 이용한 품질 향상 정도를 비교적 정확히 검증하기 위하여 실증 설비가 구축된 2군데(충청도 소재 A사, 세종시 소재 B사)의 설비를 이용하였으며, 이를 통해 생산된 순환굵은골재(20~25 mm)의 품질 향상 효과를 확인하기 위해 설비를 통과하기 전과 통과한 후의 골재를 각각 5회씩 채취하여 반복 실험을 실시하였다.

순환굵은골재의 품질 향상 실험 항목으로는 입도 분포, 절대건조밀도, 흡수율, 마모감량, 입자모양판정실적률, 0.08 mm 체 통과량 시험에서 손실된 양, 점토덩어리량, 안정성, 유기이물질 및 무기이물질 함유량 등이 있으며, 각각의 실험 항목은 Table 4에 나타난 바와 같이 국가표준에서 규정하고 있는 각각의 KS 시험방법에 따라 실시하였다.

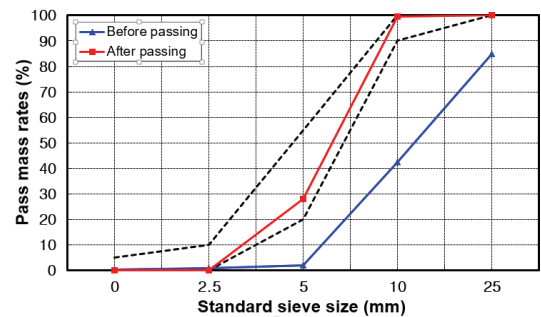
#### 3.2 실험결과

##### 3.2.1 입도

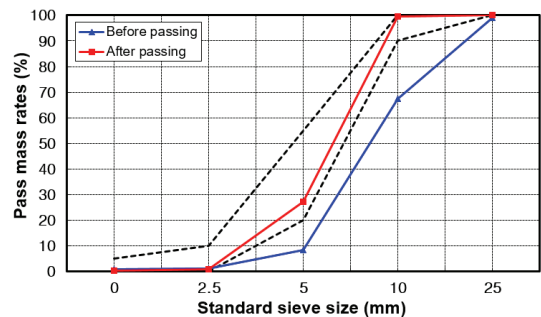
방사형 회전판을 설치한 임팩트 크러셔에 의한 순환굵은골재의 입도분포는 Table 5, Fig. 3에 나타난 바와 같이 모두 2.5 mm~5 mm에서 통과 전에 비해 통과 후에 감소하였으며, 10 mm~25 mm에서는 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 임팩트 크러셔에 의하여 골재표면의 페이스트의 박리효과와 골재의 파쇄 작용이 효과적으로 이루어진 결과에 기인한 것으로 판단되며 '순환골재의 품질기준'에서 규정하고 있는 콘크리트용 순환굵은골재의 표준입도 기준에 만족하여 콘크리트용 순환굵은골재로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 5. Test result of particle size distribution

Particle size distribution (%)	Sieve size (mm)						
	2.5	5	10	20	25		
<b>Quality standards range</b>	<b>0~5</b>	<b>0~10</b>	<b>20~55</b>	<b>90~100</b>	<b>100</b>		
<b>Co. A</b>	1	Before passing	0	1	2	39	80
		After passing	0	0	35	100	100
	2	Before passing	1	1	2	44	80
		After passing	0	0	21	100	100
	3	Before passing	0	0	1	38	90
		After passing	0	0	24	99	100
	4	Before passing	1	1	3	45	85
		After passing	0	0	28	100	100
	5	Before passing	0	1	2	47	89
		After passing	0	1	32	99	100
<b>Aver.</b>	<b>Before passing</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>2.0</b>	<b>42.6</b>	<b>84.8</b>	
	<b>After passing</b>	<b>0</b>	<b>0.2</b>	<b>28.0</b>	<b>99.6</b>	<b>100</b>	
<b>Co. B</b>	1	Before passing	0	0	2	61	99
		After passing	0	0	28	99	100
	2	Before passing	0	1	3	65	100
		After passing	0	0	32	100	100
	3	Before passing	1	1	7	52	96
		After passing	0	1	21	99	100
	4	Before passing	1	2	17	77	100
		After passing	1	2	30	100	100
	5	Before passing	2	2	13	82	100
		After passing	1	1	25	100	100
<b>Aver.</b>	<b>Before passing</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>8.4</b>	<b>67.4</b>	<b>99.0</b>	
	<b>After passing</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>27.2</b>	<b>99.6</b>	<b>100</b>	



(a) Average particle size distribution of company A



(b) Average particle size distribution of company B

Fig. 3. Test result of particle size distribution

### 3.2.2 절대건조밀도 및 흡수율

순환골재는 천연골재에 비하여 골재 표면에 부착된 모르타르에 의해 흡수율이 큰 경향이 있어 콘크리트에 적용 시 골재가 흡수하는 배합수량 증가로 슬럼프 손실이 많아지고, 펌프 압송성이 저하됨에 따라 흡수율 조절이 중요하며 또한 강도와 연관성을 지닌 밀도 조절 역시 중요하다.

본 연구의 기술 통과 전 밀도는 2.28~2.45 g/cm<sup>3</sup>, 통과 후 A사

평균 2.52 g/cm<sup>3</sup>, B사 평균 2.55 g/cm<sup>3</sup>로 약 6~10 % 증가하였으며, 흡수율은 통과 전 4.23~5.82 %, 통과 후 A사 평균 2.60 %, B사 평균 2.71 %로 약 45~52 % 감소하여 밀도와 흡수율 각각 순환골재 품질기준인 2.5 g/cm<sup>3</sup>이상, 3.0 %이하 기준을 만족하는 것으로 확인되어 콘크리트용 순환골재 골재로의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 이는 임팩트 크러셔와 방사형 회전판을 통한 타격과 낙하 시의 충돌에 의해 효율적인 페이스트 박리가 이루어

Table 6. Quality test result of recycled coarse aggregate

Item		Company A						Company B						Quality standards range	
		1	2	3	4	5	Aver.	1	2	3	4	5	Aver.		
Density (g/m <sup>3</sup> )	Before passing	2.32	2.30	2.29	2.30	2.28	<b>2.30</b>	2.45	2.45	2.44	2.35	2.33	<b>2.40</b>	2.5 or more	
	After passing	2.53	2.50	2.51	2.53	2.53	<b>2.52</b>	2.56	2.57	2.54	2.53	2.53	<b>2.55</b>		
Absorption (%)	Before passing	5.02	5.35	5.58	5.29	2.57	<b>5.36</b>	4.30	4.23	4.43	5.60	5.82	<b>4.88</b>	3.0 or less	
	After passing	2.40	2.89	2.77	2.43	2.49	<b>2.60</b>	2.50	2.42	2.73	2.98	2.93	<b>2.71</b>		
Abrasion resistance (%)	Before passing	30.5	31.4	32.8	30.7	30.1	<b>31.1</b>	31.3	31.1	33.4	34.9	34.7	<b>33.1</b>	40 or less	
	After passing	23.2	24.1	24.3	23.0	22.7	<b>23.5</b>	23.4	22.9	25.2	26.1	26.4	<b>24.8</b>		
Particle shape judgment rate (%)	Before passing	56.8	55.4	55.5	55.6	55.7	<b>55.8</b>	57.1	57.0	56.7	56.8	56.6	<b>56.8</b>	55 or more	
	After passing	59.3	58.6	58.4	58.5	58.8	<b>58.7</b>	59.4	59.6	58.8	58.9	58.4	<b>59.0</b>		
0.08 mm sieve amount (%)	Before passing	0.21	0.23	0.20	0.15	0.16	<b>0.19</b>	0.31	0.33	0.31	0.42	0.41	<b>0.36</b>	1.0 or less	
	After passing	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	<b>0.02</b>	0.10	0.09	0.08	0.36	0.31	<b>0.19</b>		
Alkali-aggregate reactivity	Before passing	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	
	After passing	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless	Hamless		
Clay lump (%)	Before passing	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	<b>0.06</b>	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	<b>0.10</b>	0.2 or less	
	After passing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.00</b>	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	<b>0.04</b>		
Stability (%)	Before passing	5.6	5.7	5.6	5.1	5.8	<b>5.5</b>	5.1	5.8	5.1	6.8	5.5	<b>5.6</b>	12 or less	
	After passing	4.0	4.2	4.3	3.7	4.0	<b>4.04</b>	4.1	3.9	4.4	4.7	4.4	<b>4.3</b>		
Impurity content (%)	Organic	Before passing	0.08	0.12	0.02	0.01	0.03	<b>0.05</b>	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	<b>0.02</b>	1.0 or less (volume)
		After passing	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	<b>0.02</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	
	Inorganic	Before passing	0.04	0.01	0.08	0.19	0.13	<b>0.09</b>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	<b>0.01</b>	1.0 or less (mass)
		After passing	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00	<b>0.02</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>	

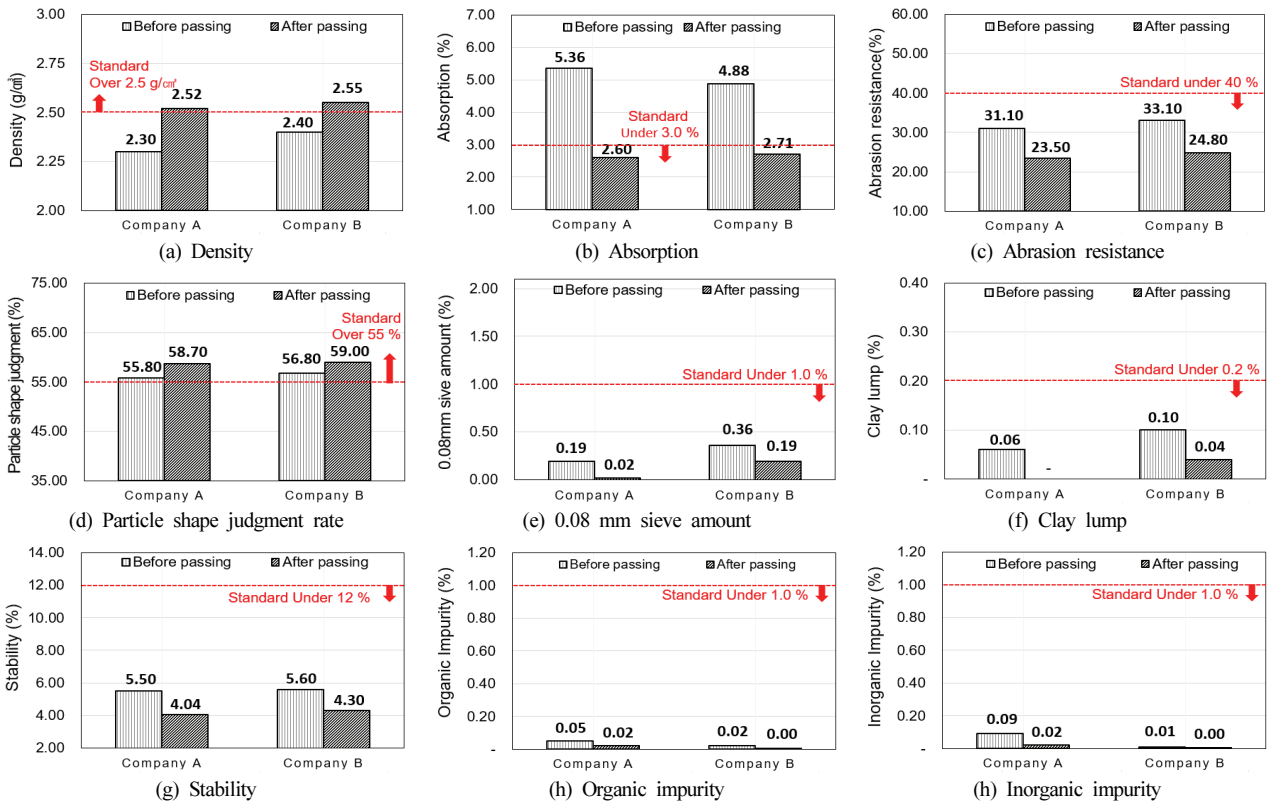


Fig. 4. Quality improvement of recycled coarse aggregate

진 것에 기인한 결과로 사료된다.

### 3.2.3 마모감량

마모감량 시험은 골재의 마모저항성을 시험하는 것으로, 마모 저항이 요구되는 콘크리트에 사용가능한지 여부를 판정하는데 이용된다. 통과 전 마모감량은 31.1~33.1 %, 통과 후에는 A사에서 23.5 %, B사에서 24.8 %로 약 24~25 % 정도 개선되었으며 순환 골재 품질기준인 40 %에 비하여 확연히 낮게 나타나 내마모성이 우수함을 알 수 있었으며 콘크리트용 순환골재로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2.4 입자모양판정실적률

골재의 입자모양은 골재 사이의 공극 및 실적률에 영향을 미치는데 입자 모양이 평평하거나 가늘고 길고 모난 골재를 사용할 경우 공극률이 커져 다량의 시멘트 페이스트와 잔골재량의 소모를 필요로 하게 된다. 본 실험의 통과 전 입자모양판정실적률은 55.8~56.8 %로 품질기준을 만족하였으나, 통과 후에는 A사 평균 58.7 %, B사 평균 59.0 %로 더욱 증가하는 경향을 나타내어 방사형

회전판을 설치한 임팩트 크러셔에 의한 입자모양 품질이 향상되었음을 짐작할 수 있다.

### 3.2.5 0.08 mm 체 통과량 시험에서 손실된 양(%)

순환골재는 생산과정 중에 세척이나 집진, 비중 선별, 스크린 등의 설치 및 적용을 통하여 발생된 미분이 상당 부분 제거될 수 있는 것으로 보고된바 있다(Kim et al. 2011). 본 연구의 0.08 mm 체 통과량 실험 결과에서도 충돌에 의한 박리와 이후 스크리닝에 의한 미세입자가 선별됨에 따라 통과 전에 비하여 통과 후의 골재 품질이 개선되었음을 알 수 있으며 품질기준 1.0 %를 충분히 만족시켜 콘크리트용 골재로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2.6 알칼리골재반응

알칼리골재반응은 골재가 함유한 반응성 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 콘크리트 속의 알칼리(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> 등)가 반응하는 현상으로 콘크리트 내부에 국부적인 체적팽창이 발생하여 콘크리트에 균열이나 박리가 현상을 일으키는 요인이 된다. 본 연구의 반응 실험에서는 통과 전, 후 골재 모두 무해한 것으로 확인되어 콘크리트용 골재로의

적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2.7 점토덩어리량

점토덩어리가 다량으로 함유된 골재가 콘크리트에 적용 될 경우 시멘트 페이스트와 골재 또는 철근과의 부착력을 감소시킨다고 연구된 사례가 있다(Park 2017). 실험 결과 통과 전 0.06~0.10 %, 통과 후 A사 평균 0.0 %, B사 평균 0.04 %로 개선되었으며 품질기준을 만족하는 값으로 콘크리트에 적용 시 강도, 내구성에 거의영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 이 개선 효과 역시 방사형 회전판의 충돌 효과가 유발한 파쇄·박리 작용에 기인한 것으로 사료된다.

### 3.2.8 안정성

안정성 평가를 위해 황산나트륨 포화용액으로 인한 골재 붕괴 작용에 대한 저항성 실험을 한 결과 통과 전 5.1~6.8 % 범위에서 통과 후 A사 평균 4.04 %, B사 평균 4.3 %로 약 23~27 % 감소하여 기준 값 12 % 에 비해 낮은 값으로 안정성이 매우 높으며 콘크리트에 적용가능 할 것으로 판단된다.

### 3.2.9 유기·무기 이물질 함유량

골재 함유된 이물질은 시멘트 페이스트와 골재 사이의 부착력 감소, 시멘트의 수화작용 방해 등을 유발한다. 특히 순환골재 생산 이 건설폐기물로부터 이루어지기 때문에 이물질의 함유 및 이를 제거하는 공정은 필수적인 요소이다. 유기이물질 함유량 실험결과 통과 전 0.01~0.12 %, 통과 후 A사 평균 0.02 %, B사 평균 0.00 %로 약 60~100 % 개선되었으며, 무기이물질 함유량은 통과 전 0.00~0.09 %, 통과 후 A사 평균 0.02 %, B사 평균 0.00 %로 약 50~100 % 개선되었으나 통과 전 무기이물질의 함유량 자체가 적어 비교적 유기이물질 제거 효과가 좋은 것으로 나타났다. 이는 기술을 통과하며 낮은 비중의 이물질이 부유되어 선별된 것으로 판단된다.

## 4. 콘크리트 적용을 통한 검증 실험

### 4.1 실험계획 및 방법

앞서, 2개 회사의 품질향상 실험을 통해 본 연구에 적용한 기술의 성능을 확인하였고, 순환골재 콘크리트에 적용성을 확인하기 위한 일환으로 보다 품질변화가 크게 일어난 A사의 순환골은골재를 활용하여 콘크리트의 물리적 특성 실험을 실시하였다. 유동특성 파악을 위하여 KS F 4009에 따라 공기량 4.5 ± 1.5 %, 슬럼프

190 ± 15 mm를 기준으로 초기, 60분 후에 측정을 실시하였으며 콘크리트의 압축강도 특성 파악을 위하여 순환골은골재를 0, 30, 60, 100 % 치환한 콘크리트 공시체를 제작하여 재령 28일, 56일의 압축강도 시험을 진행하였다. 이때 사용한 재료의 물리·화학적 특성은 Table 7~9과 같으며, 콘크리트 배합비는 Table 10과 같이 순환골재 품질기준에서 규정한 단위시멘트량 280 kg/m<sup>3</sup>이상, 단위수량 185 kg/m<sup>3</sup>이하의 조건을 만족하고 27 MPa 콘크리트의 배합으로 물시멘트비 45 %, 잔골재율 48.5 %로 설정하였다.

Table 7. Physical properties of cement

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Degree of condensation		Stability (%)	Loss on ignition (%)
			Initial	Closing		
Portland cement	3.14	3,600	3:05	5:05	Stable	0.95

Table 8. Chemical properties of cement

CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Others (%)
63.31	1.09	3.18	0.00	2.00	0

Table 9. Physical properties of aggregate

Division	Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption rate (%)	Unit weight (kg/l)
Coarse aggregate	Crushed gravel	2.60	0.69	1.51
	Recycled coarse aggregate	2.52	2.60	1.56
Fine aggregate	Washed sand	2.56	0.73	1.63

Table 10. Mixing properties

Replacement ratio (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					AE WRA***
			Water	Cement	Sand	NCA*	RCA**	
0	45	48.5	135	390	895	950		2.95
30	45	48.5	135	390	895	665	285	
60	45	48.5	135	390	895	380	570	
100	45	48.5	135	390	895		950	

\* Natural coarse aggregate

\*\* Recycled coarse aggregate

\*\*\* AE water reducing agent

## 4.2 실험결과

### 4.2.1 공기량 및 슬럼프

순환굵은골재를 혼입한 콘크리트의 초기 공기량은 혼입률이 0, 30, 60, 100 %로 증가함에 따라 4.1, 4.0, 3.9, 4.3 %로 혼입률 0~60 % 범위에서는 큰 변화가 없었으며, 혼입률 100 % 일 때 소폭 증가한 경향을 나타내었다. 경시변화에 따른 공기량 변화는 3.0, 2.6, 3.3, 3.9 %로 순환굵은골재 혼입률이 30 % 일 때 소폭 감소한 후 혼입률 증가에 따라 공기량도 증가하였다. 이러한 변화는 충격에 의한 순환 굵은골재 표면에 여전히 잔재하는 모르타르의 내부 공극이 많은 특성에 의해 갇힌 공기가 증가한 것에 기인한 것으로 판단된다.

콘크리트의 초기 슬럼프는 혼입률 증가와 관련 없이 180~200 mm로 설정한 기준 190 ± 15 mm를 만족하였다. 경시변화에 따른 콘크리트의 슬럼프 저감율을 확인한 결과, 혼입률 0~60 % 범위에서는 혼입률이 증가함에 따라 슬럼프 저감율은 낮아지는 경향을 나타내었고 혼입률 100 %에서는 60 %와 유사한 저감율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 임팩트 크러셔와 방사형 회전판에 의한 충돌로 인하여 생산된 순환굵은골재의 입형이 비교적 둥근 형태를 지니며 골재의 마찰로 인한 슬럼프 저감율을 저감시키는 영향과 직결되는 것으로 예상할 수 있으며 동일한 배합조건에서는 대개 입형이 날카롭고 굴곡진 천연골재에 비하여 순환굵은골재의 슬럼프 저감 영향이 발생되는 것으로 사료된다.

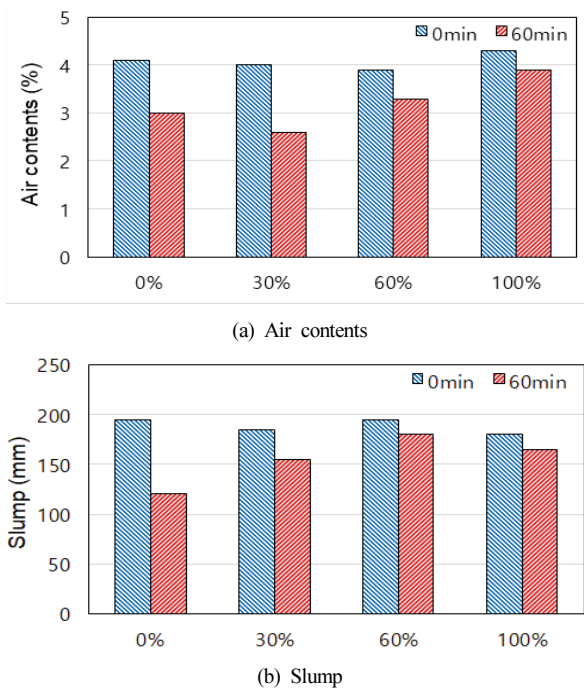


Fig. 5. Result of air contents and slump test

### 4.2.2 압축강도 특성

Fig. 6은 순환굵은골재의 혼입률에 따른 재령별 콘크리트 압축강도 특성을 나타낸 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 재령 7일까지의 압축강도 발현은 순환 굵은골재 혼입률 0, 30, 60, 100 %로 증가함에 따라 29.6, 27.8, 28.7, 26.1 MPa를 나타내어 혼입률의 증가와 관계없이 유사한 강도를 나타내었다. 반면, 이후 재령 28일이 도래함에 따라 혼입률별 압축강도는 36.8, 33.7, 32.1, 28.1 MPa를 나타냄으로써 재령 7일에 비해 강도증가분은 7.2, 5.8, 3.5, 2.0 MPa에 그쳐 확연하게 둔화되는 것을 알 수 있다. 28일 이후 재령 56일 사이에는 혼입률 별 강도증가분은 3.0, 2.7, 2.8, 2.5 MPa로 순환굵은골재의 혼입률에 관계없이 유사한 경향을 나타내며 일반적인 거동을 보이고 있다. 이러한 경향은 순환굵은골재가 콘크리트의 압축강도 특성 중 7~28일 재령 사이의 강도발현에 일정 영향을 끼치는 것으로 알 수 있으며, 이는 순환골재의 특성인 갈라짐 등의 불규칙한 입형과 표면에 부착된 시멘트 페이스트에 의한 다량의 공극이 재령이 지남에 따라 압축강도 증가분의 둔화에 영향을 끼친 결과로 사료된다. 순환굵은골재의 혼입률이 100 % 일 때 혼입률이 30, 60 %일 때에 비해 압축강도 증가분이 적은 것 또한 상기와 같은 이유에서 비롯되는 결과로 사료된다.

한편, 천연골재를 대신하여 순환굵은골재를 100 % 혼입한 경우를 제외하고 모두 설계기준강도 27 MPa를 만족한 것은 순환굵은골재가 아닌 잔골재와 시멘트 등 타 재료에 의한 강도발현도 일정 수준 영향을 끼쳤을 것으로 사료되며, 이러한 결과는 혼입률 60 % 이내에서는 콘크리트의 배합비율에 따라 순환굵은골재의 활용이 가능할 것으로 판단할 수 있다. 다만, 혼입률 100 %의 경우 강도비율이 80 %에도 미치지 못하여 콘크리트에 활용은 불가능할 것으로 판단된다.

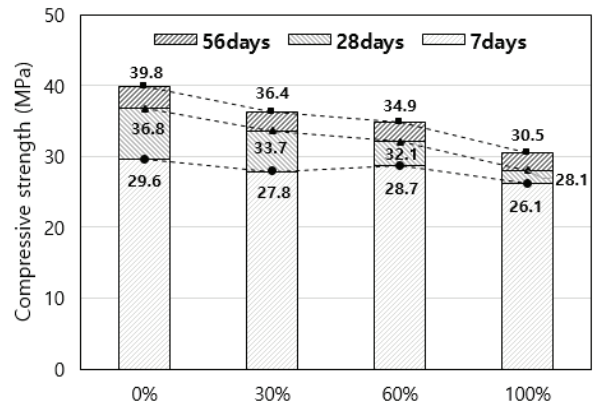


Fig. 6. Test result of compressive strength



## 5. 결론

본 연구에서 방사형 회전판을 하단에 설치한 임팩트 크러셔를 개발하고 이를 이용하여 생산한 순환골재의 품질성능 향상 효과를 확인한 결과는 다음과 같다.

1. 수직형 임팩트 크러셔의 원심력에 의한 충돌에너지를 통해 골재에 부착된 큰 덩어리의 모르타르를 제거하고 방사형 회전판에 의한 완충효과로 충격에너지를 낮추어 잔재물을 제거하는 기술을 개발하고 시물레이션을 통해 모르타르 페이스트 제거 성능이 효율적인 것으로 확인되었다.
2. KS에 따른 순환골재의 시험방법에 의하여 품질 향상 성능을 검토한 결과 모든 항목에서 개선된 품질을 나타내는 것으로 확인하였고, 순환골재 품질기준에서 규정하는 기준에 부합하여 콘크리트용 순환골재로 활용이 가능할 것으로 검토하였다.
3. 순환골재를 혼입한 콘크리트의 공기량은 혼입률 0~60 % 범위에서는 큰 변화가 없고, 혼입률 100 % 일 때 소폭 증가한 경향을 나타내었으나 기준에 부합하였으며, 슬럼프 또한 국내 슬럼프 기준에 부합하였다.
4. 순환골재 혼입률이 100 % 일 때 7~28일 재령 사이에서 강도증가분이 둔화하였고, 이를 제외한 혼입률 0, 30, 60 % 콘크리트는 설계기준강도 27 MPa를 만족하였다.

본 연구 결과를 통해 순환골재의 혼입률이 콘크리트의 재령별 압축강도에 일정 수준 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었으며, 순환골재의 혼입률이 100 %일 때는 강도증가의 둔화가 급격히 커진 것으로 보아, 혼입률 60 % 수준까지는 잔골재와 시멘트 등 다른 재료에 의한 강도발현이 가능하여 배합설계에 따라 콘크리트에 활용 가능성이 있는 것으로 판단되며 100 %는 사용이 불가할 것으로 판단된다.

그러나, 순환골재의 현장 실용화를 위해서는 장기적 관점에서 내구성 시험과 같은 추가적인 검증도 필요할 것으로 판단되어 추후 실험을 통해 결과를 논의하고자 한다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 2022년도 한국건설기술연구원 평가인증사업의 지원에 의해 수행된 연구임(NO. 20220037-001).

## References

- Han, S.K., Park, O.Y., Jang, H.O. (2020). A technology to remove organic matters and improve segregation of recycled aggregates by using rotational rakes separator and tornado vacuum separator, Magazine of Korean Recycled Construction Resources Institute, **15(2)**, 39–44 [in Korean].
- Jang, G.S., Kim, S.W., You, Y.C., Kim, K.H., Yun, H.D. (2009). Compressive behavior of reinforced recycled coarse aggregate concrete columns, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(2)**, 227–234 [in Korean].
- Jeon, E., Yun, H.D., Ji, S.G., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H. (2009). Mechanical properties of ready-mixed concrete with recycled coarse aggregates, Journal of Architectural Institute of Korea, **25(8)**, 103–110 [in Korean].
- Jo, W.I. (2012). A Study on the Improvement of Quality through the Production Process of Recycled Coarse Aggregate for Concrete in Construction Waste, Master's Thesis, Konkuk University.
- KS F 2504 (2019). Density and Water Absorption Test Method of Fine Aggregate, In: Korean Standards and Certifications, Korean Industrial Standards, Eumseong, Korea.
- KS F 2527 (2018). Aggregate for Concrete, In: Korean Standards and Certifications, Korean Industrial Standards, Eumseong, Korea.
- Lee, S.H. (2019). A study on the improvement of the quality of recycled fine aggregate by impact and multistage wind processing method of rotor hammer, Journal of Korea Society of Waste Management, **36(6)**, 560–566 [in Korean].
- Lee, S.H., Shim, J.W. (2010). Enactment provision of recycled aggregate concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **22(1)**, 33–35 [in Korean].
- Ministry of Land Infrastructure and Transport in Korea (2017). Recycled Aggregate Quality Standard.
- Song, S.H., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H., Yun, H.D. (2009). Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(4)**, 431–439 [in Korean].

### 방사형 회전이 추가된 임팩트 크러셔를 이용한 콘크리트용 순환골재 품질향상 및 검증 연구

본 연구는 고품질의 콘크리트용 순환골재를 생산할 수 있는 타격 완충 장치인 방사형 회전판을 하단에 설치한 임팩트 크러셔를 개발하고 이를 이용하여 생산한 순환골재의 품질성능 향상 효과 및 콘크리트 실험을 통해 적용 가능 여부를 검증하는 것을 목적으로 한다. 그 결과, 절대건조밀도, 흡수율, 마모감량, 입자모양판정실적률, 0.08 mm 체 통과량 시험에서 손실된 양, 알칼리골재반응, 점토덩어리량, 안정성, 이물질함유량 등 모든 항목에서 개선된 품질을 나타내었고 순환골재 품질기준에서 규정하는 기준에 부합하는 것으로 나타났다. 또한, 순환골재를 적용한 콘크리트의 공기량 및 슬럼프는 국내 기준에 모두 부합하며 순환골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 재령별 압축강도 특성 실험 결과에 따라 순환골재의 혼입률 60 %까지는 적용이 가능할 것으로 확인되었다.