

분쇄 효율에 따른 순환골재 분말 혼입 모르타르의 특성

방진욱¹, 장영일^{2*}, 이종원³, 문석호⁴, 추현승⁴

Characteristics of Recycled Aggregate Powder Containing Mortar Depending on Grinding Efficiency

Jinwook Bang¹, Youngil Jang^{2*}, Jongwon Lee³, Seokho Mun⁴, Hyunseung Chu⁴

Abstract: In order to evaluating applicability of RAP (recycled aggregate powder) in mortar, in this study, physical and mechanical tests was carried out. Material characteristics of recycled aggregate and RAP were evaluated and the mechanical properties of mortar replaced with RAP were analyzed. Test result of sieve analysis showed that as the milling time increased the fineness modulus was decreased and the distribution of 0.6 mm particle size was found to increase. The fluidity of mortar mixture substituted with RAP tended to increase than Plain mixture. It was result that the increasing fluidity was affected by unreacted surplus water in the mortar as the binder was replaced with RAP. From the compressive strength result of the mortar subjected to RAP, it was found that the RAP was able to replace up to about 10% of unit binder weight although the compressive strength of mortar was decreased as the RAP replacement increased. From the above study, it can be concluded that the physical properties of RAP satisfied the quality standard of aggregate for replacement with fine aggregate. Moreover, in case of the RAP was replaced up to 10% of unit cement weight, it was able to be possible to improve fluidity and compressive strength of mortar.

Keywords: Recycled aggregate, Recycled aggregate powder, Mortar, Ball mill

1. 서 론

최근 콘크리트구조물의 노후화, 성능저하 또는 용도 및 목적의 변경 등으로 인하여 콘크리트 구조물을 해체하여 재건설이 증가되고 있으며, 경제성장 및 국민들의 생활수준 향상에 따른 주거 및 주위환경의 개선에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서, 도심개발 및 노후화된 구조물의 재건축 사업이 증가함에 따라(Moon et al., 2002) 건설폐기물 발생량이 매년 지속적으로 증가되고 있다. 건설폐기물 중에서 콘크리트가 차지하는 양은 약 63%정도이며, 파쇄, 분리, 여과 등의 공정을 거쳐 폐콘크리트의 약 95%를 순환골재로 생성하여 건설자재로 대체하여 활용되고 있다. 주로, 도로기층보조기층용, 콘크리트 2차 제품용, 건축 토목공사의 성토용, 보도블록용, 순환잔골재, 선별토사 등으로 재활용하고 있다(Ministry of Environment, 2015).

2005년도부터 적용된 『건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률』에 의거하여 순환골재를 의무적으로 사용하도록 권고하고 있지만 순환골재의 재활용률은 높지 않은 실정이다. 건설재료용 천연골재를 생산하기 위해서는 석산을 개발하거나 해사를 채취하는 등의 작업이 필연적으로 자연환경 훼손이 불가피 하다. 이를 예방함과 아울러 폐콘크리트 매립으로 인한 환경파괴를 방지하기 위해서 순환골재의 다량 활용방안 및 수요처 개발은 필수적이다(Kim, et al., 2003 and Choi, et al. 2004).

기존의 국내연구에서는 순환골재 자체를 굵은골재 또는 잔골재 대체재로 연구가 활발히 진행되고 있으나(Choi, et al. 2005 and KICT. 2014) 순환골재를 분말화하여 활용하는 심층적인 연구에 대해서는 전무한 실정이다(Lee, et al. 2008; Kim, et al. 2012 and Zhu, et al. 2016). 순환골재의 특성상 높은 흡수율을 가지고 있고, 모르타르 제조 시 컨시스턴시가 낮은 성격과 순환골재 표면에 부착된 모르타르가 존재해 유동성 및 강도발현에 영향을 주고 있다(Han, et al. 2010). 따라서, 순환골재를 분말(Recycled Aggregate Powder; 이하 RAP)화 하여 순환골재 외부에 부착된 구제 시멘트를 제거하는 효과와, 순환골재의 흡수율이 크다는 점을 역이용하는 방안을 모색하고자 한다. 불밀을 통해 분말도를 증진시킨 순환골재 미분말이 모르타르 속의 잉여수를 흡수하고, 나머지 분체들은 필러효과로 모르타르 내부의 공극을 감소시킴으로서 강도발현에 효과가 높

¹정회원, (주)동양 기술연구소 연구개발팀장

²정회원, 충남대학교 건설공학교육과 부교수

³정회원, 충남대학교 융복합시스템공학과 박사과정

⁴정회원, 충남대학교 건설공학교육과 학부과정

*Corresponding author: jang1001@cnu.ac.kr

Department of Construction Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 것으로 예상된다(Letelier, et al. 2017 and Manzi, et al. 2017). 따라서, 본 연구에서는 RAP의 활용 가능성에 대한 기초연구 자료를 도출하기 위하여, 순환골재 및 RAP의 재료적 특성을 파악하고, 시멘트 대체재로 RAP를 적용한 모르타르의 물리·역학적 특성을 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 RAP의 제조 조건 및 실험범위

본 연구에서는 분쇄시간에 따라 순환골재 미분말을 제조하였으며, RAP의 조건에 따른 모르타르의 실험범위는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental variables

W/B(%)		50
Binder : Sand		1:3
RAP(%)		5, 10, 15, 20
Ball mill time(Hr)		3, 6, 9, 12, 24
Test items	Physical & mechanical properties	- Granularity - Flow test - Compressive strength test

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 S사에서 생산되는 밀도 3.14 g/cm³의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

2.2.2 잔골재

본 연구에 사용된 골재는 국내 K사에서 제조된 잔골재는 ISO 표준사로서 입도, 인증값 및 불확도는 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of aggregate

Sieve size	Reference value of ISO	certification values	Uncertainty of measurement (confidence level = 95%, k=2)
2.0mm	0	0%	0%
1.6mm	(7±5)%	7.1%	3.0%
1.0mm	(33±5)%	33.2%	3.0%
0.5mm	(67±5)%	67.9%	3.0%
0.16mm	(87±5)%	87.7%	3.0%
0.08mm	(99±5)%	99.6%	1.0%

2.2.3 순환골재

순환골재는 건설 폐기물 중 폐콘크리트를 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 거쳐 건설폐기물을 제 35조(국토교통부장관은 환경부장관과 협의하여 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위하여 순환골재의 용도별 품질기준 및 설계·시공 등에

관하여 필요한 기준을 정하여야 한다.)에 따른 순환골재 품질 기준에 맞는 것을 사용하였다.



Fig. 1 Recycled aggregate

2.3 실험방법

2.3.1 RAP의 제조

볼밀 분쇄기 작업은 PL-BM20L 실험용 볼밀을 사용하였다. 볼밀의 효율을 높이기 위하여 작은 볼 40개와 큰 볼 10개를 혼용하여 작업을 실시하였다. 이 볼들의 총 무게는 985.85g이며, 큰 볼 10개의 무게는 338.93g이며, 작은 볼 40개의 무게는 646.92g이다. 다음 Fig. 2는 볼밀 분쇄기 장치 및 작업 전경이다.



(a) Recycled aggregate input



(b) Ball input



(c) milling



(d) RAP

Fig. 2 Milling step of RAP

2.3.2 조립률

순환골재의 분쇄효율 평가를 위해, KS F 2502 『굵은골재 및

잔골재의 체가름 시험방법』에 준하여 조립률을 평가하였다.

2.3.3. 플로우

모르타르 흐름값 시험은 KSL 5111 『시멘트 시험용 플로 테이블(Flow table for use in tests of hydraulic cement)』에 준하여 모르타르 혼합 후 실시하였다.

2.3.4 압축강도

모르타르 압축강도 시험은 KSL ISO 679 『시멘트의 압축강도 시험(Methods of testing cement-Determination of strength)』에 준하여 재령 3, 7, 28일 수중양생 후 만능재료시험기를 이용하여 측정하였다.

2.4 공시체의 제작

모르타르의 압축강도 측정을 위한 공시체는 Table 3과 같은 배합으로 KSL ISO 679 『시멘트의 강도 시험방법(Methods of testing cement-Determination of strength)』에 준하여 제작하였다. 제조된 모르타르는 1일 양생 후 탈형하여 항온항습기에서 온도 20℃의 수중 침지 상태로 양생하였으며, 재령 3일, 7일, 28일별 압축강도 및 휨강도를 측정하였다.

Table 3 Mix proportions

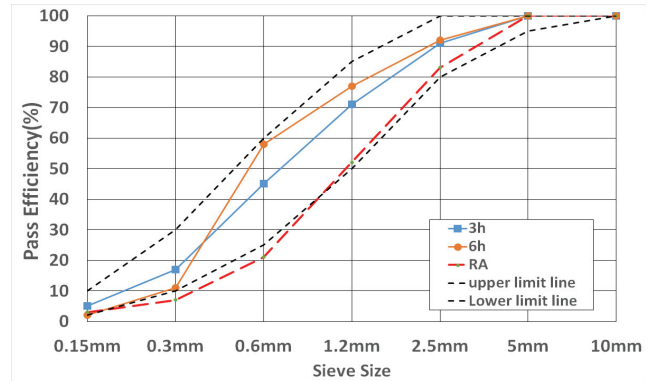
Mix	W/B (%)	Water (g)	Weight (g)			
			C	RAP	S	B
OPC100%+RA0%	50	225	450.0	0	1350	450
OPC95%+RA5%	50	225	427.5	22.5	1350	450
OPC90%+RA10%	50	225	405.0	45.0	1350	450
OPC85%+RA15%	50	225	382.5	67.5	1350	450
OPC80%+RA20%	50	225	360.0	90.0	1350	450

3. 실험결과 및 고찰

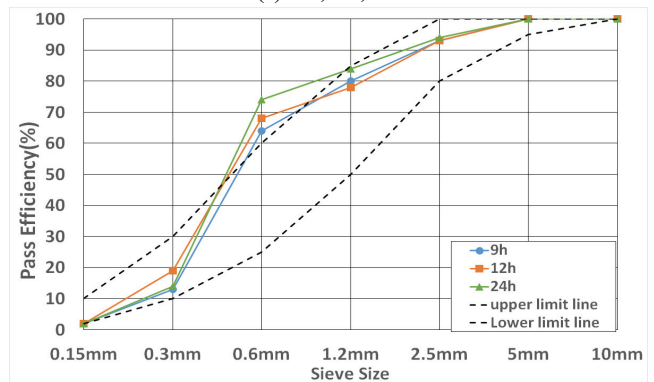
3.1 RAP 특성

불밀 분쇄기에 의해 분말화한 RAP를 채취하여 체가름 시험을 실시하였으며, 입도분포곡선을 나타낸 것은 Fig.3과 같다. 본 실험에서 사용된 순환골재 자체의 입도분석결과, 미립분이 낮은 특성을 나타내었고 1.2mm 미만 입도에서는 잔골재 하한선에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 불밀 분쇄시간 3, 6시간 시험체의 경우, 잔골재 입도곡선 범위 내에 분포하는 것으로 나타나 일정 시간의 분쇄는 오히려 잔골재 입도분포에 효과적인 것으로 판단된다.

9시간 이상 분쇄 하였을 경우, 0.3~2.5mm의 입도 분포가 증가되는 것으로 나타났다. 특히, 24시간 분쇄한 시험체의 경우 3시간 분쇄의 경우보다 0.6mm 입도분포가 60.0%p 증가되는 것으로 나타났다.



(a) RA, 3H, 6H



(b) 9H, 12, 24H

Fig. 3 Particle size distribution curve of RAP according to the ball mill time

입도분석 실험결과를 바탕으로 조립률을 계산한 결과는 Table 4에 나타내었다. 순환골재의 경우 조립률 3.35로 잔골재 조립률 권장기준인 2.3~3.1을 초과하는 것으로 나타났으며, 분쇄 후에는 조립률이 감소되어 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 높은 입도의 순환잔골재를 분쇄함으로써 미분체의 증가로 인해 조립률이 감소하였다.

분쇄 시간에 따른 입도분석 결과, 3시간 및 6시간의 분쇄 시 순환잔골재를 골재로서 활용 가능성이 높은 것으로 판단되며, 본 연구에서 적용하고자 하는 미분체 증가를 위해서는 9시간 이상 분쇄하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Table 4 Fineness modulus

Type	RA	3h	6h	9h	12h	24h
F.M.	3.35	2.73	2.62	2.49	2.42	2.33

3.2 모르타르 유동특성

불밀 시간에 따라 제조된 RAP를 시멘트 대체재로 사용하여 제조된 모르타르의 흐름값을 나타내었다. 실험결과, 5~15% RAP 치환 배합에서 RAP 및 RA를 혼합하지 않은 Plain 보다 높은 흐름값을 나타내었다. 이는 배합조건에서 시멘트 대체재로 RAP 및 RA를 혼합함으로써 결합재량이 다소 감소되어 유동성이 높아진 것으로 판단된다. 한편, 동일한 RAP 치환 조건에서 3, 6시간 분쇄된 RAP를 혼합할 경우 분쇄를 하지 않은 RA에 비하여 플로우가 감소되었으나, 9시간 이상의 분쇄 시 플로우가 증가되는 현상을 나타내어 분쇄시간이 높아지면 잔골재 흡수를 감소에 효과가 일부 있는 것으로 판단된다.

이러한 현상은 5~15%의 혼입율에서도 순환잔골재의 분쇄 시간에 따라 유동성이 높아지는 동일한 경향을 나타내어 순환잔골재의 분쇄효과가 우수한 것으로 판단된다.

유동특성 시험조건에서는 분쇄된 순환잔골재의 적정 혼입율은 15% 이하로 판단되며, 그 이상의 혼입을 고려한다면 적절한 혼화제의 사용 등이 추가로 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한 미분적용을 위한 분쇄시간은 최소 9시간 이상이 적절할 것으로 사료된다.

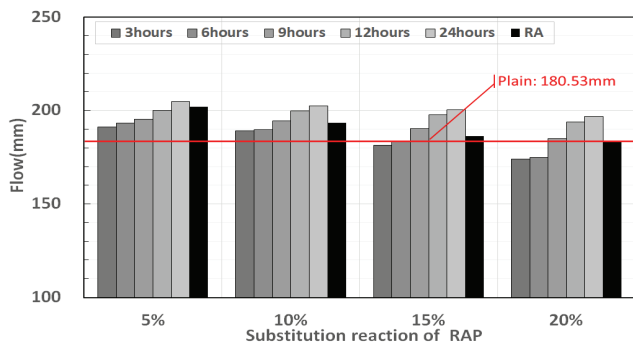


Fig. 4 Mortar flow with time of ball mill

3.3 모르타르 압축강도

불밀 시간에 따라 제조된 PAP의 시멘트 대체재로 적용가능성 평가를 위해 KS L ISO 679에 준하여 습윤양생 후 각 연령에 따라 강도 시험을 실시하였다.

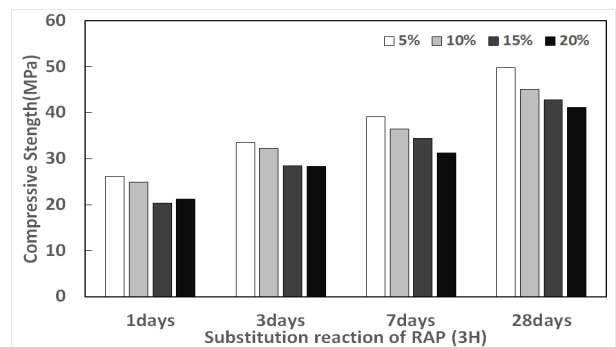
압축강도시험 결과는 Fig 5 (a)~(f)에 나타내었다. RA 및 RAP를 혼합하지 않은 Plain의 경우 28일 강도가 51.6MPa로 측정되었으며, RA 및 RAP의 치환율의 증가에 따라 강도의 감소가 큰 것으로 나타났다. 하지만, RA를 혼합한 배합에서는 강도 감소가 큰 특징을 나타내었고, RAP의 경우 분쇄시간에 따라 강도 감소율이 다르게 나타났다.

분쇄 시간별 강도특성은 3시간, 6시간 분쇄한 시험체는 치환율 증가에 따라 강도가 크게 감소되었지만, 9시간 이상의 분쇄한 시험체는 치환율이 20%까지 증대되더라도 강도감소

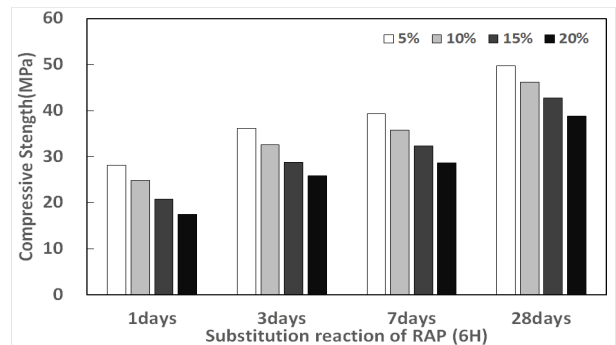
율이 다소 낮게 나타났다. 이는 분쇄효율이 증대됨에 따라 순환잔골재에서 탈락된 구제 모르타르가 결합재의 성능을 발휘하며, 나머지 잔골재는 흡수율이 저감됨으로 인해 강도의 향상이 이루어진 것으로 판단된다.

재령 28일의 분쇄조건 및 치환율에 따른 압축강도 시험결과를 요약하여 Fig. 5(g)에 나타내었다. 모든 배합조건에서 Plain에 비하여 강도가 감소되었지만, RA사용 배합보다 RAP의 적용 시 강도향상 효과가 있는 것으로 확인되었다.

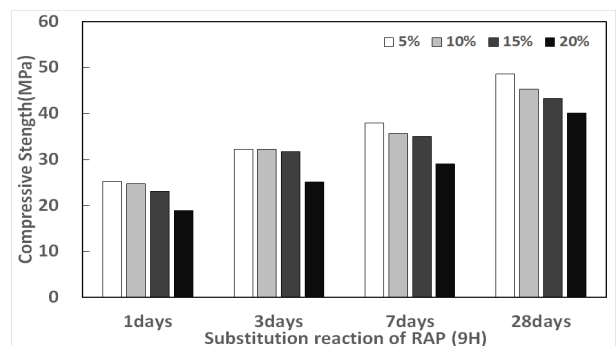
시멘트 치환율 5%에서 Plain에 대비하여 최대 96.6% (6H), 시멘트 치환율 10%에서 최대 90.4%(12H)의 강도 발현이 가능한 것으로 나타나, 치환율과 일부 배합 조정이 이루어질 경우 결합재 대체재로 10%정도까지는 적용이 가능할 것으로 판단된다.



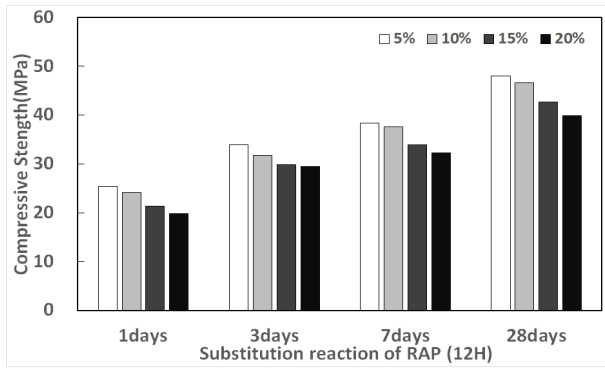
(a) RA



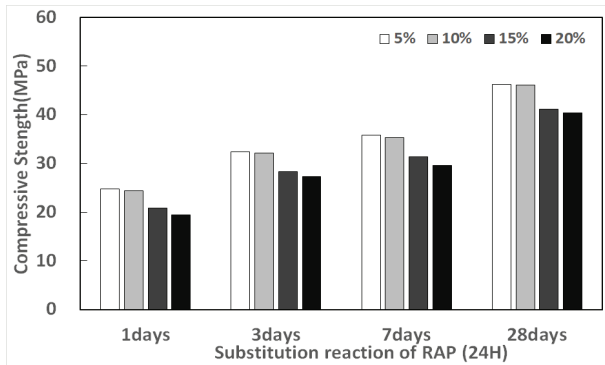
(b) Ball mill time: 3 hr



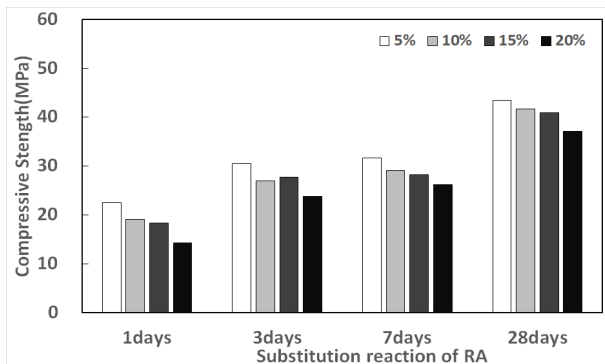
(c) Ball mill time: 6 hr



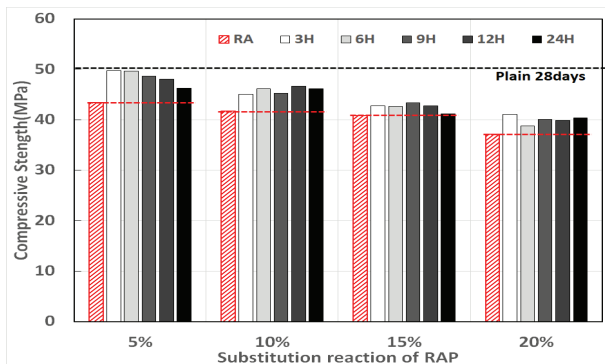
(d) Ball mill time: 9 hr



(e) Ball mill time: 12 hr



(f) Ball mill time: 24 hr



(g) 28day curing

Fig. 5 Compressive strength of mortar according to ball mill time

4. 결론

본 연구에서는 순환골재를 분쇄한 RAP의 적용가능성을 검토하기 위해, RAP의 품질특성 및 RAP 적용 모르타르의 물리·역학적 시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) RAP를 체분석한 결과, 분말 시간에 따라 0.6mm체에서 잔류량이 높아짐에 따라 조립률이 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 분말화하는 시간이 증대됨에 따라 순환골재의 분쇄가 원활하게 진행되어, 입자의 크기가 조밀하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 순환골재 자체로도 적용이 가능함을 확인하였다.
- (2) RAP를 혼입한 모르타르의 흐름값은 결합재의 감소 및 순환골재의 흡수율 감소, 입형 개선 등의 영향으로 흐름값이 증가되는 것으로 나타났으며, 분쇄하지 않은 순환골재 보다 우수한 성능을 나타내었다.
- (3) RAP를 혼입한 모르타르의 압축강도 평가 결과, 분말 시간에 따라 재령 28일에서 Plain대비 90% 이상의 강도 발현을 확인하였다. 강도조건에서는 10%까지 결합재 대체재로 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 이상의 연구로부터 분말화한 순환골재는 잔골재 대체재로서도 품질특성을 만족할 수 있는 것으로 나타났으며, 본 연구 범위에서는 결합재 대체재로 약 10% 적용 시 유동성 개선 및 강도 확보가 가능할 것으로 판단되며, 향후 추가로 내구성 등의 평가가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1D1A1A 09082743).

References

- Moon, D.J. and Moon, H.Y. (2002) Evaluation on Qualities of Recycled Aggregate and Strength Properties on Recycled Aggregate Concrete. Journal of the Korean Society of Civil Engineers A, 22(1A), 141-150.
- Ministry of Environment. (2017) National Waste Generation and Disposal Status, Korea Waste Association, 73-74.
- Kim, M.H. and Kang, S.P. (2003) Technology for Reuse of Waste Concrete. Magazine of the Korea Concrete Institute, 15(2), 21-29.
- Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, S.S., Kim, K.H. and Moon, H.Y. (2004) Fundamental Properties of Mortar Utilizing Waste Concrete Powder. Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference,

620-623.

- Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, S.S., Jung, J.G. and Kim, Y.J. (2005) The Effect on the Quality Properties of Mortar by Surface Area of Waste Concrete Powder. Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference, 365-368.
- KICT. (2014) Study on Activation of Recycled Aggregate, Korea Institute Of Construction Technology., 1-224.
- Lee, S.H., Jung, D.J. and Choi, I.C. (2008) Mechanical Properties of Recycled Powder mixing Concrete. Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference, 769-772.
- Kim, Y.J. and Choi, Y.W. (2012) Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, Construction and Building Material, 30, 500-504.
- Zhu, P., Mao, W., Li, Z. and Ma, Z.J. (2016). Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete, Construction and Building Materials, 113, 246-254.

- Han, M.C. and Jeon, K.N. (2010) Effect of Maximum Size and Contents Method of Recycled Aggregate Powder on Engineering Properties of the Cement Mortar. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, (12), 129-136.
- Letelier, V., Tarela, E. and Moriconi, G. (2017) Mechanical properties of concrete with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement, Procedia Engineering, 171, 627-632.
- Manzi, S., Mazzotti, C. and Bignozzi, M.C. (2017) Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate : Study of the long-term properties, Construction and Building Materials, 157, 582-590.

Received : 12/31/2018

Revised : 01/29/2019

Accepted : 02/12/2019

요 지 : 본 연구에서는 분쇄한 순환골재 분말(RAP)을 건설소재로 활용하기 위하여 순환골재 및 RAP의 재료적 특성을 파악하고, 시멘트 대체재로 RAP를 적용한 모르타르의 물리·역학적 특성을 분석하였다. RAP 입도분석결과, 불밀 시간이 증가함에 따라 0.6mm 입도의 분포량이 증가하고, 조립률은 감소하는 것으로 나타났다. RAP를 치환한 모르타르의 유동성은 Plain 보다 향상되었으며, 이는 RAP를 결합재 대체재로 적용함으로써 잉여수의 증가하고 이로 인해 유동성이 증가된 것으로 판단된다. RAP를 적용한 모르타르의 압축강도 평가 결과, 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 낮아지는 경향을 나타내었지만, 약 10%까지는 치환하여 사용가능한 것으로 판단된다. 이상의 연구로부터 분말화한 순환골재는 잔골재 대체재로서도 품질특성을 만족할 수 있는 것으로 나타났으며, 본 연구 범위에서는 결합재 대체재로 약 10% 적용시 유동성 개선 및 강도 확보가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 순환골재, 순환골재 분말, 모르타르, 불밀
