

실험계획법을 이용한 가열방식의 순환굵은골재 제조를 위한 실험적 연구

An Experimental Study on Heating Manufacture of Recycled Aggregate by Design of Experiment

(Received February 6, 2013/ Revised March 8, 2013 / Accepted March 11, 2013)

남은용¹⁾, 황선복^{2)*}

한국건설생활환경시험연구원¹⁾, 전라남도 구례군청²⁾

Eun-yong Nam¹⁾, Sun-bok Hwang²⁾

Korea Conformity Laboratories, Jeonju, 561-330, Korea

Dept. of Construction, Gurye-gun, Gurye, 542-803, Korea

Abstract

The use of wasted concrete can settle the environmental pollution and shortage of natural aggregate. However, recycled aggregate includes substantial amount of cement paste, so that these aggregates are more porous, and less resistant to mechanical actions than natural aggregates. Recently, the new manufacturing processes of high quality recycled aggregates were suggested such as heating. In this paper, for the purpose of manufacture of high quality recycled aggregates, the heating processes was considered to the existing process of recycled aggregates. To find the optimum process, the experiment was performed through the statistical design of experiment. The heating temperatures of 4 levels (300, 450, 600 and 750°C) and heating duration time (5, 20, 40, 60minute) were main experimental variables. Through the test results, it was found that the optimum manufacturing condition of coarse recycled aggregate was evaluated to be 600°C and 40minute.

키워드 : 순환굵은골재, 가열 및 분쇄, 제조조건

Keywords : recycled coarse aggregate, heating and grinding, manufacturing condition

1. 서론

최근 세계 선진국들은 인간의 사회경제활동에 의한 필연적 산물인 폐기물의 처리 및 활용 방안에 대해서 관심이 고조되고 있으며, 폐기물 정책도 관리 측면에서 재활용 측면으로 급격하게 변화하고 있는 실정이다. 2006년 환경부 통계에 따르면 총 폐기물 발생량(지정폐기물 제외)은 318,670톤/일로, 생활폐기물 15.3%, 사업장배출시설계폐기물 31.7%, 건설계기물 53%로 가장 큰 구성비율을 차지하고 있으며 그 성상을 살펴보면 폐콘크리트가 전체 건설폐자재류중 65.3%로서, 골재 채취에 따른 환경파괴 및 부존

자원 고갈 방지 차원에서 대체골재의 개발이 절실히 요구되어지고 있는 현실에서 폐콘크리트에 대한 재활용의 필요성은 시대적 당면과제이다.

현재 폐콘크리트는 수집·운반 과정을 통하여 중간처리 업체에서 순환골재로 생산되고 있지만 건설폐기물 재활용에 대한 인식부족과 처리방법 및 기술연구의 미비로 건설폐기물 순환골재의 품질향상에 많은 어려움을 겪고 있으며, 높은 이물질 함유량, 높은 흡수율, 높은 마모율, 낮은 골재 강도 등과 같은 생산된 순환골재의 낮은 품질특성, 순환골재 발생원에 따른 품질 변동 폭이 큰 특성 등은 순환골재 재활용 활성화에 걸림돌로 작용하고 있다. 이에 현재 생산되는 순환골재는 주로 성토용 또는 매립용과 같은 초보적 품질을 요하는 단계에 주로 활용되고 있으며, 콘크

* Corresponding author

E-mail: sunbok78@korea.kr

리트용 등과 같이 부가가치가 높은 용도로 활용되는 수준은 미비한 실정이다.¹⁾

이러한 순환골재는 표면에 부착되어 있는 기존 시멘트 페이스트에 의해서 비중, 흡수율, 씻기손실량 및 불순물 함유량 등에서 상대적으로 품질이 떨어진다.²⁾ 따라서, 고품질의 순환골재의 제조기술에서 가장 중요한 기술은 순환골재 표면에 부착되어 있는 기존 시멘트 페이스트의 제거 기술이라고 할 수 있다.

최근에는 단순 파쇄 기술로는 고품질의 순환골재를 제조할 수 없다는 인식이 확산되어 가열, 용해 등의 기술이 제안되기 시작하고 있는 실정이다.⁹⁾ 이론적으로 가장 확실한 시멘트 페이스트 제거 방법은 염산 등의 산용액에 순환골재를 침지시켜 시멘트 페이스트를 제거하는 방법이 가장 확실할 것으로 추정되나, 생산기간의 장기화, 경제성 결여 및 산용액에 의한 환경오염 부담 증가 등의 이유로 비현실적인 제조 방법으로 알려져 있다.¹⁰⁾

이에 반해서 가열에 의해서 시멘트 페이스트를 제거하는 방법은 기존 방법에 비하여 다소 경제성이 떨어지지만, 제조공정이 상대적으로 단순하며 그 효과도 어느 정도 확실할 것으로 추정된다. 왜냐하면, 시멘트 수화물은 350~750°C에서 제거되는 특성을 가지고 있기 때문에 이러한 온도에서 순환골재를 추가 분쇄한다면 기존의 시멘트 페이스트 제거에는 상당히 용이한 방법일 것이다.³⁾

이러한 가열에 의한 새로운 고품질 순환골재 제조 기술에 대한 실험적 연구는 현재까지 국내외에서 거의 수행된 적이 없고 윤병원³⁾은 개념적인 특허를 등록한 상태이므로, 적정 제조 조건 설정이 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.

따라서 가열에 의한 고품질 순환 골재 제조 조건 설정을 위해서 본 연구에서는 적정 가열 온도, 가열 시간 및 적정 첨가제량 등에 대하여 통계적 이론에 근거하여 실험을 실시하였고, 적정 제조 조건 및 제조된 순환 골재의 품질을 평가하여 콘크리트용으로서의 적용성을 평가하였다.

2. 실험 내용

2.1 순환골재의 제조

본 연구에 사용된 순환골재의 제조 공정은 대략 다음과 같으며 Fig. 1에 나타내었다.

- ① 해체현장에서 채취된 폐콘크리트를 조크러셔로 150 mm 정도로 분쇄한다.

- ② 흙, 목재, 금속, 플라스틱 등의 이물질을 분리, 제거한다.
- ③ 임팩트 크러셔로 파쇄하고 크기별로 골재를 분류한다.
- ④ 분류된 골재를 가열로에 투입하여 소정의 온도, 시간으로 가열한다.
- ⑤ 벤토나이트 분말이 첨가된 골재를 볼밀(ball mill)로 분쇄한 후 세척하여 고품질 골재를 제조한다.

상기 제조공정에서 ①~③ 단계는 기존의 일반적인 순환골재 생산과 동일한 공정이며, ④~⑦ 단계가 새롭게 추가된 가열 및 분쇄 공정이다.

최종 분쇄된 물질을 열처리하는 단계는 열처리장치에 의해 이루어진다. 즉, 600°C 내지 750°C 정도에서 1시간 가량 열처리를 한 후 합성기를 통해 첨가제인 벤토나이트를 합성하는데 이는 표면 이물질이 제거된 순환골재의 강도를 강화시키기 위해서 이다.¹⁰⁾

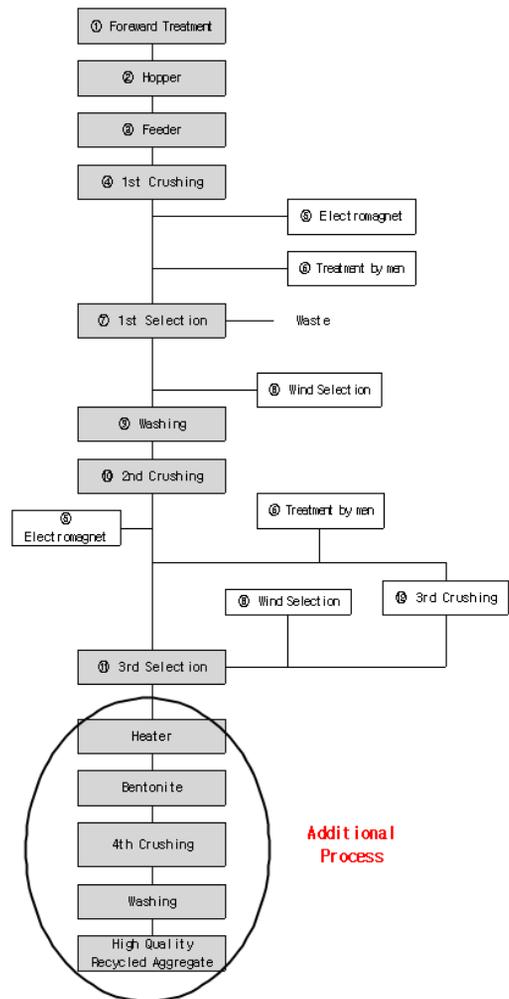


Fig. 1 Manufacturing process of recycled aggregates

2.2 실험 변수, 항목 및 방법

실험변수는 가열 온도, 가열 시간 및 벤토나이트 첨가율로 결정하였으며, 가열 온도는 300, 450, 600 및 750°C 4 수준(변수명 A), 가열 시간은 5, 20, 40, 60분 4수준(변수명 B) 그리고 벤토나이트 첨가율은 중량비율로 0, 1, 2% 3수준(변수명 C)으로 정하였으며, 순환굵은골재에 대하여 총 48 경우이다. 실험은 통계적 의미를 갖도록 하기 위하여 실험계획법을 이용하였으며, 주 변수가 3 가지이므로 3원 배치법을 이용하였다.⁴⁾

가열실험 전후의 시료에 대한 사진을 다음 Fig. 2에 나타내었다.



(a) sample before heating



(b) sample after heating

Fig. 2 Photos of experiments

실험 항목은 순환골재의 물성 중 가장 중요한 흡수율 및 절대건조 비중으로 결정하였고, 실험방법은 KS F 2573-2006 “콘크리트용 순환골재” 규정에 준하여 수행하였다. 한편 콘크리트용 순환굵은골재의 KS 품질 기준은 Table 1과 같다.⁵⁾

3. 실험결과의 분석 및 검토

3.1 기존 순환골재의 물성

기존 생산 방식으로 제조된 순환골재를 생산공장에서 시료를 채취하여 흡수율, 절대건조 비중 실험을 실시하여, 그 결과를 Table 2에 나타내었으며, 실험결과는 본 연구에서 사용된 시료의 경우, 기존 방식으로 제조된 순환굵은골재의 물성은 KS 품질 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 1 Standard of recycled coarse aggregates⁷⁾

item	KS quality condition	
water absorption (%)	≤ 3.0	
oven-dry gravity	≥ 2.5	
abrasion ratio (%)	≤ 40	
ratio of absolute volume (%)	≥ 55	
amount of loss at pass test of 0.08mm sieve (%)	≤ 1.0	
alkali aggregate reaction	harmlessness	
amount of ball of clay (%)	≤ 0.2	
soundness (%)	≤ 12	
amount of foreign substance (%)	organic	≤ 1.0
	inorganic	≤ 1.0

Table 2 Quality of existing recycled aggregates

Water absorption (%)	Oven-dry gravity
4.19	2.37

3.2 순환굵은골재의 흡수율

기존 생산 방식으로 제조, 채취된 순환굵은골재 시료에 대하여 2.2절에서 기술한 실험변수들에 대한 가열 실험을 수행하여 순환굵은골재의 흡수율을 구하였다.

흡수율 실험 결과는 다음 Table 3에 나타내었으며 KS 품질 기준을 만족하는 경우는 표 내부를 음영 처리하였다.

Table 3에서 알 수 있듯이 가열온도가 300°C(A1)인 경우는 KS 품질 기준을 항상 만족하지 못하는 것으로 나타났다, 가열시간도 최소 20분(B2) 이상이어야 함을 알 수 있었다.

실험 결과를 통계적으로 처리한 결과, 3원배치법에 의한 분산분석표(ANOVA Table)⁴⁾를 Table 4에 나타내었으며, 이 내용을 고찰해 보면 신뢰도 95%수준에서는 A, B 및 A × C(교호작용)이 유의한 영향인자이며, 신뢰도 99%에서는 A, B만이 유의한 영향인자인 것으로 나타나, 유의하지 않

은 인자를 제거한 수정된 분산분석표⁴⁾를 Table 5에 나타내었으며, 그 결과 A, B인자만이 매우 유의한 것으로 나타나고 있다. 즉, 가열온도와 가열시간만이 유의한 인자임을 알 수 있다.

또한 실험 결과를 95% 신뢰도의 T분포 검정정을 수행한 결과는 Table 6, 점추정값은⁴⁾ Fig. 3에 나타내었다. Table 6에서 알 수 있듯이 현행 KS 품질 기준을 만족하는 순환골은골재의 흡수율은 최소 600°C, 20분이상 가열 또는 450°C, 40분이상 가열을 실시하여야 KS의 흡수율 기준을 만족하는 순환골은골재를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.

3.3 3원배치법의 분산분석표

통계적 처리를 위해 사용된 Table 4와 같은 3원배치법에 의한 분산분석표(ANOVA Table) 작성 및 이용법을 좀더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- ① 결과의 제곱합(S)과 자유도(DOF : 변수의 수준 수 - 1)을 구한다.
- ② 제곱합을 자유도로 나누어 평균제곱(V)을 구한 후, 오차의 평균제곱(V_e)과의 비율로 F₀를 구한다.
- ③ 또한 95%, 99% 신뢰수준의 F 분포 값 F(0.05)과 F(0.01)을 구하여 F₀와 비교하여 해당 변수의 유의 여부를 결정한다.
- ④ 유의하지 않은 변수를 제거한 후, 유의한 변수만으로 다시 분산분석을 수행하면 Table 5와 같은 수정된 분산분석표를 구할 수 있다.

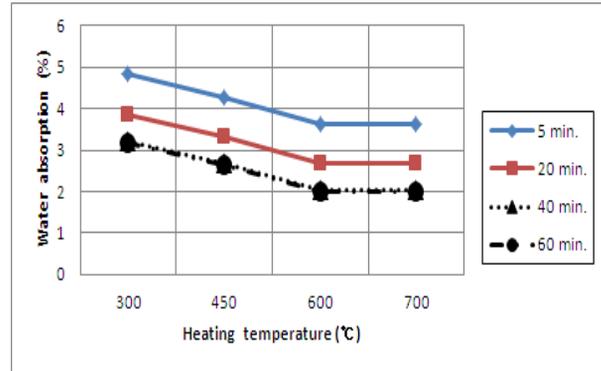


Fig. 3 Point estimated value for the water absorption of recycled coarse aggregates at confidence level 95%

Table 3 Test result of water absorption of recycled coarse aggregates (unit : %)

Variable		A1 (300°C)	A2 (450°C)	A3 (600°C)	A4 (750°C)
B1 (5min.)	C1(0%)	4.44	3.92	2.74	3.80
	C2(1%)	5.02	3.82	4.06	4.26
	C3(2%)	4.53	4.53	4.47	3.48
B2 (20min.)	C1(0%)	3.76	3.63	2.78	3.01
	C2(1%)	3.52	3.04	2.72	2.45
	C3(2%)	3.55	3.93	2.81	2.44
B3 (40min.)	C1(0%)	3.35	2.04	2.02	1.90
	C2(1%)	3.39	2.52	2.17	2.01
	C3(2%)	3.33	2.83	2.01	2.21
B4 (60min.)	C1(0%)	3.22	2.22	1.67	1.83
	C2(1%)	4.07	2.65	1.70	1.86
	C3(2%)	3.08	3.61	1.87	1.78

Table 4 Deviation analysis for the water absorption of recycled coarse aggregates

	S	DOF	V	F ₀	F(0.05)	significance level 5 %	F(0.01)	significance level 1 %
A	11.81	3	3.94	41.1	3.16	effective	5.09	effective
B	21.05	3	7.02	73.3	3.16	effective	5.09	effective
C	0.56	2	0.28	2.9	3.55		6.01	
A × B	1.52	9	0.17	1.8	2.46		3.6	
A × C	1.83	6	0.30	3.2	2.66	effective	4.01	
B × C	0.98	6	0.16	1.7	2.66		4.01	
Error	1.72	18	0.10					
Total	39.47	47						

* S : sum of square, DOF : degree of freedom, V : mean square, F₀ : ratio of mean square to error
F(0.05), F(0.01) : F-distribution value at cumulative probability of 95% and 99%

Table 5 Pooled deviation analysis for the water absorption of recycled coarse aggregates

	S	DOF	V	F ₀	F(0.05)	significance level 5 %	F(0.01)	significance level 1 %
A	11.81	3	3.94	24.4	2.83	effective	4.3	effective
B	21.05	3	7.02	43.5	2.83	effective	4.3	effective
Error	6.61	41	0.16					
Total	39.47	47						

Table 6 Estimated value for the water absorption of recycled coarse aggregates at confidence level 95%

	A1	A2	A3	A4
B1	4.51~5.13	3.96~4.58	3.32~3.94	3.32~3.94
B2	3.56~4.18	3.01~3.63	2.37~2.99	2.37~2.99
B3	2.90~3.52	2.36~2.98	1.71~2.33	1.71~2.33
B4	2.88~3.50	2.34~2.96	1.70~2.32	1.70~2.32

3.4 순환굵은골재의 절대건조 비중

기존 생산 방식으로 제조, 채취된 순환굵은골재 시료에 대하여 본 연구의 실험변수들에 대한 가열 실험을 수행하여 순환굵은골재의 절대건조 비중을 구하였으며, 그 결과는 다음 Table 7에 나타내었으며 KS 품질 기준을 만족하는 경우는 표 내부를 음영 처리하였다.

Table 7에서 알 수 있듯이 가열온도 600°C, 가열시간 40분 이상이어야 KS 품질 기준을 만족함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통계적으로 처리한 결과, 3원배치법에 의한 분산분석표를 Table 8에 나타내었으며, 이 내용을 고찰해보면 신뢰도 95%수준에서는 A, B 및 A×B가 유의한 영향인자이며, 신뢰도 99%에서는 A, B만이 유의한 영향인자인 것으로 나타나, 유의하지 않은 인자를 제거한 수정된 분산분석표를 Table 9에 나타내었으며, 그 결과 가열온도와 가열시간만이 매우 유의한 인자임을 알 수 있다.

이 결과를 95% 신뢰도의 T분포 검정정을 수행한 결과를 Table 10, 점추정값을 Fig. 4에 나타내었다. Table 10에서 알 수 있듯이 현행 KS 품질 기준을 만족하는 순환굵은골재의 절대건조 비중은 최소 600°C, 40분이상 가열을 실

시하여야 KS의 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 7 Test result of oven-dry gravity of recycled coarse aggregates

Variable		A1	A2	A3	A4
B1	C1	2.35	2.40	2.48	2.40
	C2	2.32	2.40	2.39	2.37
	C3	2.35	2.42	2.36	2.42
B2	C1	2.40	2.42	2.48	2.46
	C2	2.42	2.45	2.48	2.50
	C3	2.43	2.40	2.48	2.50
B3	C1	2.43	2.48	2.56	2.55
	C2	2.44	2.50	2.54	2.55
	C3	2.44	2.47	2.56	2.54
B4	C1	2.43	2.52	2.57	2.55
	C2	2.40	2.49	2.55	2.57
	C3	2.45	2.42	2.56	2.55

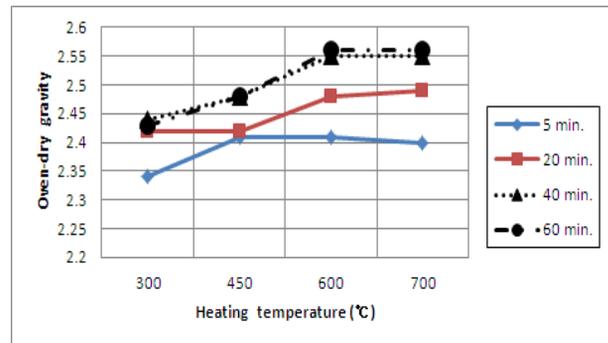


Fig. 4 Point estimated value for the oven-dry gravity of recycled coarse aggregates at confidence level 95%

Table 8 Deviation analysis for the oven-dry gravity of recycled coarse aggregates

	S	DOF	V	F0	F(0.05)	significance level 5 %	F(0.01)	significance level 1 %
A	0.07	3	0.02	48.1	3.16	effective	5.09	effective
B	0.11	3	0.04	72.1	3.16	effective	5.09	effective
C	0.00	2	0.00	0.1	3.55		6.01	
A × B	0.01	9	0.00	3.1	2.46	effective	3.60	
A × C	0.01	6	0.00	2.1	2.66		4.01	
B × C	0.00	6	0.00	1.5	2.66		4.01	
Error	0.01	18	0.00					
Total	0.22	47						

Table 9 Pooled deviation analysis for the oven-dry gravity of recycled coarse aggregates

	S	DOF	V	F0	F(0.05)	significance level 5 %	F(0.01)	significance level 1 %
A	0.07	3	0.02	38.9	2.90	effective	4.46	effective
B	0.11	3	0.04	58.3	2.90	effective	4.46	effective
A × B	0.01	9	0.00	2.5	2.19	effective	3.02	
Error	0.02	32	0.00					
Total	0.22	47						

Table 10 Estimated value for the oven-dry gravity of recycled coarse aggregates at confidence level 95%

	A1	A2	A3	A4
B1	2.31~2.37	2.38~2.44	2.38~2.44	2.37~2.43
B2	2.39~2.45	2.39~2.45	2.45~2.51	2.46~2.52
B3	2.41~2.47	2.45~2.51	2.52~2.58	2.52~2.58
B4	2.40~2.46	2.45~2.51	2.53~2.59	2.53~2.59

3.5 기타 품질

본 실험에서 도출된 적정 조건(600°C, 40분 가열)의 가열방식에 의해 제조된 고품질 순환굵은골재의 “콘크리트용” 으로의 적용성을 평가하기 위하여 KS F 2573-2006 “콘크리트용 순환골재” 규정에 준하여 Table 1과 같은 실험을 수행하여 그 결과를 Table 11에 나타내었다.^{6,7,8)}

Table 11에서 알 수 있듯이 기존방식으로 제조된 순환굵은골재는 절대 건조 밀도, 흡수율, 마모감량, 입자모양판정실적률 및 0.08mm체 통과량 시험에서 손실된 양 등의 중요 항목들에서 KS 품질 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

반면에 앞서 도출된 적정 조건(600°C, 40분 가열)의 가열방식에 의해 제조된 고품질 순환굵은 골재는 전 항목에서 KS 품질기준을 만족하는 것으로 나타나, KS F 2573-2006 “콘크리트용 순환골재”를 만족하므로 구조용 콘크리트에 안정적으로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 11 Test results of recycled coarse aggregates

Item	KS quality condition	manufacture method		
		existing	proposed	
water absorption (%)	≤ 3.0	4.19	2.01	
oven-dry gravity	≥ 2.5	2.37	2.56	
abrasion ratio (%)	≤ 40		28	
ratio of absolute volume (%)	≥ 55	48	72	
amount of loss at pass test of 0.08mm sieve (%)	≤ 1.0	1.4	0.2	
alkali aggregate reaction	harmless-ness	harmless-ness	harmless-ness	
amount of ball of clay (%)	≤ 0.2	0.11	0.07	
soundness (%)	≤ 12	6	4	
amount of foreign substance (%)	organic	≤ 1.0	0.04	0.04
	inorganic	≤ 1.0	0.3	0.3

4. 결론

본 논문에서는 최근 시도되고 있는 가열에 의한 새로운 순환골재 제조에 대한 연구는 현재까지 국내에서는 수행된 적이 없어, 적정 가열 온도, 가열 시간 및 적정 첨가제량 등에 대하여 통계적 이론에 근거하여 실험을 실시하였다.

또한 실험결과로부터 적정 제조 조건 및 제조된 순환골재의 품질을 평가하였다. 이러한 일련의 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존 방식으로 제조된 순환굵은골재의 물성은 일부 항목에서 KS 품질기준을 만족하나, 일부에서는 KS 품질기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

2) 순환굵은골재의 흡수율 측면에서 보면, 최소 600°C, 20분 이상 가열 또는 450°C, 40분 이상 가열을 실시하여야 KS의 흡수율 기준을 만족하는 순환굵은골재를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 순환굵은골재의 절대건조 비중 측면에서 보면, 최소 600°C, 40분 이상 가열을 실시하여야 KS의 흡수율 기준을 만족하는 순환굵은골재를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 벤토나이트 첨가율의 경우, 통계적 처리 결과, 본 연구에서 제시한 적정 생산 조건에서는 유의한 인자가 아닌 것으로 나타났다. 다만, 실제 생산의 경우에는 이론적으로 나타난 일정한 첨가율이 필요할 수도 있을 것으로 추정된다.

5) 본 연구에서 제시된 적정 조건(600°C, 40분 가열)의 가열방식에 의해 제조된 고품질 순환굵은 골재는 전 항목에서 KS 품질기준을 만족하는 것으로 나타나, 구조용 콘크리트에 안정적으로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 이세현, 건설폐기물의 재활용 현황 및 발전방향, 한국건설순환자원학회 논문집, 1권 1호, pp.58-62, 2005.
- 김규용 외 4인, 폐기콘크리트를 활용한 재생골재의 각종 물성에 관한 실험적 연구, 한국폐기물학회지, 15권 3호, pp. 203-209, 1998.
- 윤병원, 건축폐기물을 이용한 고순도 강화 재생모래 및 자갈 제조방법 및 장치, 대한민국특허청, 10-383569, 2003.

4. 박성현, 현대실험계획법, 대영사, 서울, pp. 195-206, 1990.
5. 한국표준협회, 한국공업표준규격 F 2573, 2011.
6. 문한영 외 1인, 토목재료학, 구미서관, 서울, pp. 366-371, 2006.
7. 이진철, 재생골재콘크리트 M의 JIS 제정, 한국건설순환 자원학회 논문집, 제3권 제1호, pp.36-40, 2007.
8. 이종열 외 3인, 건축 구조물에 재생 골재 콘크리트의 적용, 한국건설순환자원학회 논문집, 제2권 제1호, pp.49-58, 2006.
9. 建設省建築研究所, “廢棄物の建設事業への再利用技術に關する研究“, pp.117-167, 1987.
10. (財)國土開發技術研究センター, “再生コンクリートの利用技術の開発“, pp. 351-369, 1994.

실험계획법을 이용한 가열방식의 순환굵은골재 제조를 위한 실험적 연구

폐기물 콘크리트의 사용은 환경 오염과 자연 골재의 부족을 해결할 수 있으나, 이러한 재생 골재는 골재 표면에 붙어 있는 시멘트 페이스트 량이 많아서 천연골재보다 더 많은 기포를 함유하고 있어 역학적 저항능력이 감소된다. 이러한 이유로, 최근에 고품질의 재활용 재생골재의 새로운 제조 공법으로 가열 등의 해결방법이 제안되어지고 있다. 본 논문에서는 고품질의 재활용 골재의 생산을 위해, 재생골재의 현존 제조공정에 가열 및 분쇄 공정을 추가하는 방법을 제안하였다. 최적의 프로세스를 찾기 위해서 통계적 실험계획법을 사용하여 실험을 수행하였고 가열 온도(4단계 : 300, 450, 600 및 750℃) 및 가열 시간(4단계 : 5, 20, 40, 60분)이 주요 실험 변수였다. 시험 결과에 의해, 굵은 골재의 재활용을 위한 최적의 제조 조건은 600℃와 40분으로 나타났다.