

豫備加熱法에 의한 廢콘크리트 再生骨材의 物性改選

The Improvement of Properties of Recycled aggregates using Concrete Waste by Pre-heating Method.

최현수* 김호열** 최봉철*** 강병희****
 Choi, Hyun-Soo Kim, Hyo-Youl Choi, Bong-Chul Kang, Byeung-Hee

Abstract

The purpose of this study is to provide the basic data on the optimum method for interfacial separation for an effective recycle of concrete waste by using the thermal properties of concrete.

Therefore, this study is proceeded by dividing the interface of concrete into cement paste and fine aggregates or mortar and coarse aggregate, considering the aspect of recycled cement and aggregate as the recycling use of concrete waste.

As results of the experiment, in case of recycle cement, the interfacial separation is easily appeared, but it is shown that the mixed amount of powder included in fine aggregate doesn't greatly decrease.

But, in case of recycle coarse aggregate, the effect of interfacial separation by preliminary heating is predominant. Especially, the bonding rate of mortar is the lowest when it is heated 5 times for 120 minutes at 300°C.

Hence, it is considered that it will be an excellent effect of quality control when the results of this study is applied to a manufacturing system of recycle coarse aggregate which is about to put into practical use.

키워드 : 완전 순환형 콘크리트, 재생시멘트, 재생골재, 계면분리

keywords : completely recyclable concrete, recycled cement, recycled aggregate, interfacial separation

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1960년대 이후 산업발전과 함께 철근콘크리트 구조물이 국내의 건설사업에 널리 이용되고 있다. 30~40년이 경과한 현 시점에서는 구조물이 노후화 되어 도시재개발사업과 환경정비 등으로 인해 구조물의 해체공사가 증가하고 있다. 철근콘크리트 구조물 해체공사시에는 막대한 양의 건설폐기물이 발생하며, 이중 50%를 폐콘크리트가 차지하고 있다. 이로 인해 발생한 환경문제와 폐기물 처리문제 등이 사회경제적인 문제로 부각되고 있다.

또한 최근의 건설수요 증대에 의해 골재수요가 급증함에 따라 골재자원의 부족문제가 현실적인 과제로 대두되고 있어 자원의 효율성을 높이기 위해 건설폐기물의 재활용이 필수적이다.¹⁾

따라서 국내외에서는 콘크리트 폐기물을 재생골재로 재활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일본 등을 중심으로 폐콘크리트 내 미분말을 재활용한 재생시멘트에 관한 연구도 진행되어 지고 있다.

그러나 기존의 물리적인 생산방식에 의해 만들어진 재생골재는 천연골재에 비해 품질이 떨어지므로, 콘크리트 재활용 건자재의 적용에 문제가 있다. 특히 골재 표면에 모르타가 과다하게 부착된 재생골재를 콘크리트의 제조에 이용할 경우 압축강도, 내구성 및 유동성 등에 악영향을 미치게 되고, 최근 연구가 진행되고 있는 재생시멘트의 경우에도 재생시멘트 중에 포함된 잔골재의 미분말로 인하여 품질저하 문제를 일으키고 있다. 따라서 효율적인 폐콘크리트의 재활용을 위해서는 시멘트 페이스트(또는 모르타)와 골재의 효율적인 분리가 필수적이다.

이에 본 연구에서는 콘크리트의 열적성능을 이용하여, 폐콘크리트의 효율적인 재활용을 위한 최적 계면분리 방법에 관한 기초적 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 폐콘크리트의 효율적인 재활용과 그 품질관리를 위한 기술개발에 목적이 있다. 콘크리트는 다상의 재료로서 다양한 계면이 존재하며, 각 배합조건에 따른 재료의 물성과 적용범위가 상이하기 때문에 연구의 범위가 매우 넓고, 실현시 오차발생 가능성이 크다.

따라서, 본 연구에서는 폐콘크리트의 재활용 방안으로서 재생시멘트와 재생골재의 측면을 고려하여, 콘크리트의 계면을 시멘트 페이스트와 잔골재, 모르타와 굵은골재로 구분하여 연구를 진행하였다.

* 정회원, 동아대 대학원 석사과정

** 정회원, 동아대 대학원 박사수료

*** 정회원, (주)AMCO 건설본부장, 동아대 대학원 박사수료

**** 정회원, 동아대 건축학부 교수, 공학박사

그리고, 콘크리트의 열적성질을 토대로 이론적 고찰을 행한 후, 폐콘크리트의 가열시 각 구성재료의 수축팽창에 의한 계면의 분리 성상을 실험으로 검증하는 것을 본 연구의 범위로 하였다.

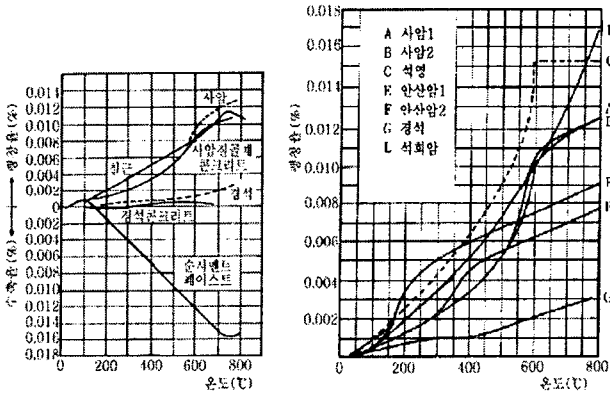
2. 콘크리트의 열적성질

일반적으로 콘크리트는 가열되면 팽창하며, 가열시의 변형 성상은 그림 1과 같이 콘크리트 중의 구성재료에 의해 지배된다.

상온수축계수로 시작되는 저온도의 콘크리트 팽창곡선은 시멘트 페이스트와 골재가 모두 팽창하는 온도의 한계인 80~90℃를 제 1차 정점으로 하고, 순 시멘트 페이스트의 고온수축성에 의하여 온도의 상승과 함께 팽창율은 감소하고 이행점 110~140℃에 이르게 된다.

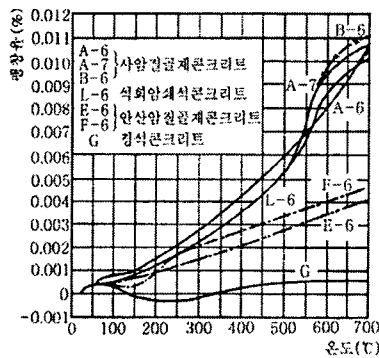
$$\xi h = \xi t - \xi s = (\alpha t - \alpha s) \Delta t \quad (1)$$

여기서, ξh : 길보기의 열변형, ξt : 열팽창변형,
 ξs : 열수축변형, αt : 열팽창계수,
 αs : 열수축계수, Δt : 온도차



a) 시멘트페이스트 및 콘크리트

b) 각종 골재



c) 각종 콘크리트

그림 1. 콘크리트 구성 재료의 고온하에서의 열팽창³⁾

3. 실험

3.1 실험인자 및 수준

본 연구의 실험인자 및 수준은 표 1과 같다.

일반적으로 페이스트의 수축변형이 생기는 온도를 110~200℃로 보기 때문에, 본 연구에서는 예비가열을 무가열(상온), 200℃, 300℃의 온도로 수준을 하였다.

재생시멘트로서의 물성실험을 실시하기 위하여 수화성 회복을 위한 본가열은 기존 연구²⁾를 토대로 700℃ 90분으로 실시한 후, 이수석고 4%를 혼합하였다.

그리고, 재생골재 실험을 위한 모재 콘크리트는 골재의 분리정도를 명확히 구분하기 위하여 굵은골재의 입도를 10~20mm 범위로 하였다.

표 1. 실험인자 및 수준

인자	母材 모르터	母材 콘크리트	예비가열 온도 (℃)	가열 시간 (min)	가열 방법	가열 횟수 (회)	recycled mortar
수준	W/C 60%	W/C 60%	무가열	60	반복 가열	1	W/RC = 60% S/RM = 45% SP = 1%
	S/M 45%	S/A 45%	200	120		3	
수준수	1	1	2	2	1	3	-

3.2 배합설계

본 연구에서 재생시멘트 및 재생골재의 모재인 모르터와 콘크리트의 배합은 표 2, 표 3과 같다.

표 2. 모재 모르터 배합표

조건	기호	W/C (%)	S/M (%)	단위중량(g/l)		
				W	C	S
母材 모르터	OM	60	45	360	600	1152

표 3. 모재 콘크리트의 배합표

조건	기호	W/C (%)	S/A (%)	단위중량(g/l)				SP (%)
				W	C	S	G	
母材 콘크리트	OC	60	45	197	327	793	1006	1

3.3 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 물성은 표 4와 같으며, 모재 모르터에 사용된 잔골재의 표준입도는 그림 2와 같다.

표 4. 사용재료의 물성

사용재료	물성
보통포틀랜드시멘트	비 중 : 3.15 분말도 : 3,200(cm^2/g)
혼화제 (고성능AB감수제)	폴리카르본산계 SP-8K 비 중 : 1.07
잔골재	경남 하동사 표준비중 : 2.56 최대치수 : 5mm 흡 수 율 : 2.29% F.M. : 2.48
굵은골재	경남 용원산 쇄석골재 표준비중 : 2.69 입 도 : 10-20mm 흡 수 율 : 1.21%

표 5. 측정방법

측 정 항 목		비 고
재생시멘트	미시구조 관찰	SEM
	분말도	KS L 5106
	비중	KS L 5110
	모르터	플로우 시험
압축강도 시험		KS L 5105
재생굵은골재	페놀프탈레인법	-
	염산용해법	-
	비중 및 흡수율	KS F 2503

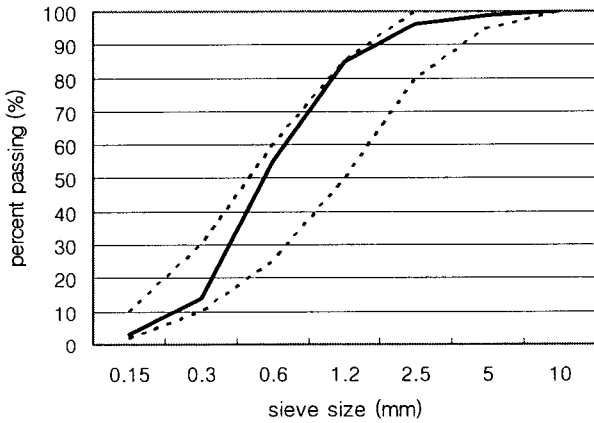


그림 2. 잔골재의 입도곡선

3.4 실험방법 및 측정

본 연구에서는 골재계면분리에 의한 품질개선효과를 고찰하기 위해 그림 3과 같이 재생시멘트와 재생골재를 제조 후 각각의 물성을 측정하였다. 그러나, 재생시멘트의 경우 잔골재와 재생시멘트 계면분리의 정량적 분석에 어려움이 있어 재생시멘트 모르터의 물성실험을 행하였다.

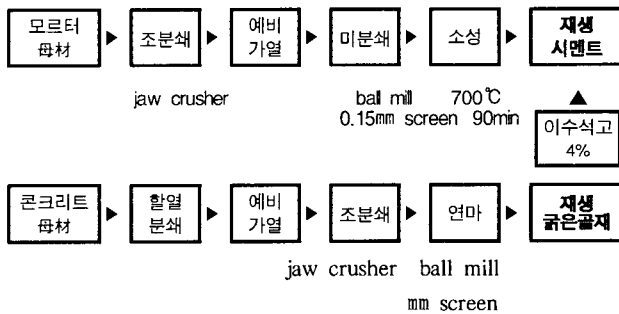


그림 3. 재생시멘트 및 재생 굵은골재의 제조

4. 실험결과 및 분석

4.1 잔골재와 재생시멘트의 계면분리

예비가열에 의한 재생시멘트와 잔골재의 계면분리효과를 고찰하기 위하여 재생시멘트의 물성실험을 행한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 실험결과표 (재생시멘트)

조건	기호	비중	분말도 (cm^2/g)	W/C (%)	Flow (%)	압축강도(kgf/cm^2)	
						7일강도	28일강도
일반	OM	3.15	3,260	60	155	360	439
non-heating	RM	2.66	3,446	60	137	33	58
200- 60-1	RM	2.62	3,506	60	150	30	48
200- 60-3	RM	2.64	3,409	60	143	33	54
200- 60-5	RM	2.86	3,533	60	180	34	57
200-120-1	RM	2.65	3,426	60	130	34	52
200-120-3	RM	2.62	3,439	60	175	35	52
200-120-5	RM	2.65	3,518	60	147	35	53
300- 60-1	RM	2.65	3,422	60	150	34	52
300- 60-3	RM	2.62	3,583	60	143	29	48
300- 60-5	RM	2.63	3,628	60	164	34	56
300-120-1	RM	2.68	3,351	60	147	31	53
300-120-3	RM	2.68	3,373	60	155	34	52
300-120-5	RM	2.68	3,385	60	145	38	62

1) 재생시멘트의 미시구조(SEM)

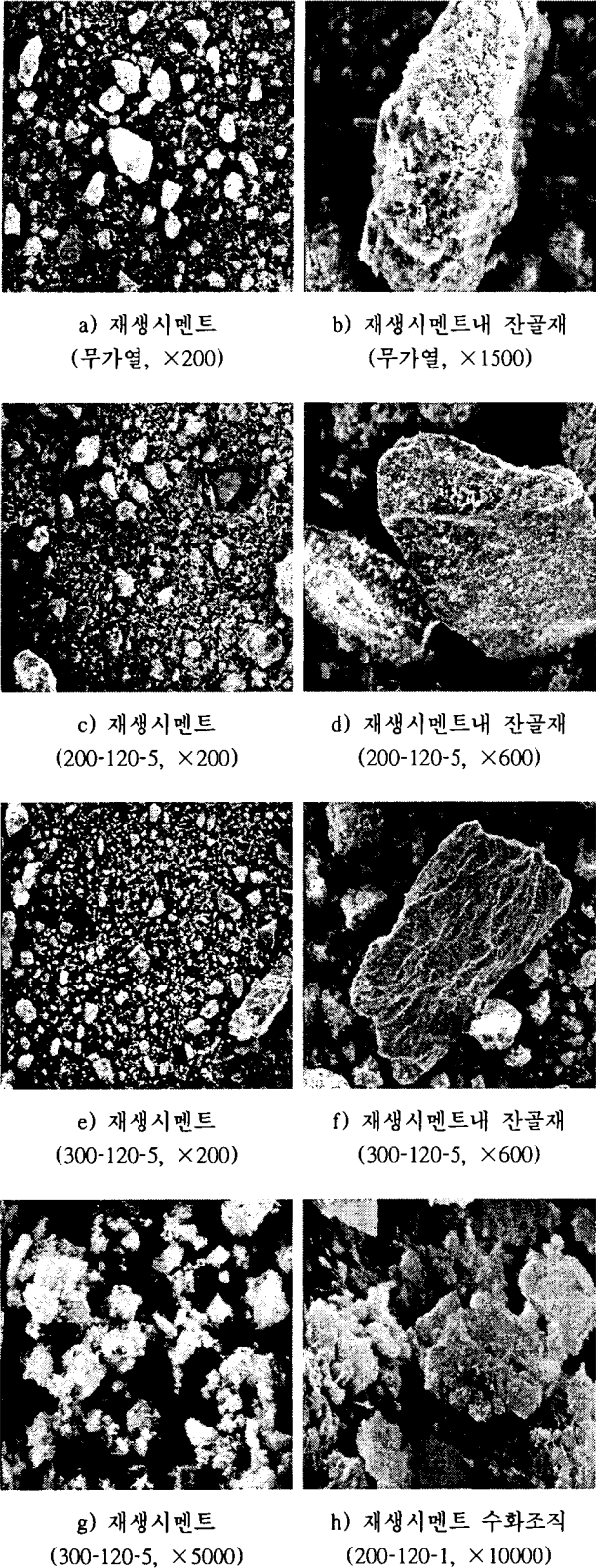


그림 4. 재생시멘트의 SEM

그림 4는 재생시멘트의 제조과정에 따른 미시구조를 주사형 전자현미경으로 관찰한 것이다.

사진 a)는 예비가열을 하지 않은 재생시멘트의 모습으로 시멘트내 많은 골재 미분이 혼입되어 있는 것으로 나타났으며, 이로 인하여 시멘트의 수화성 회복과 강도 발현에 있어 문제가 있을 것으로 판단된다. 특히, 재생시멘트 내 혼입된 잔골재 미분말(사진 b)은 예비가열을 행한 경우에 비하여 입경이 크고 골재표면에 많은 다공질 모르타가 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 200℃, 300℃로 예비가열을 행한 조건에서는 골재의 표면에 모르타 부착분이 제거된 것으로 나타났으며, 사진 e)와 같이 재생시멘트 내 골재 미분 혼입율이 감소한 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트계 폐기물 내 구성재료의 수축팽창 효과로 골재 계면 분리가 용이하게 일어났기 때문인 것으로 판단된다.

그러나, 실험시 사용한 잔골재 자체에 0.15mm 이하의 미분말이 포함되어 있기 때문에, 골재의 계면 분리가 용이하더라도 재생시멘트 내에는 많은 골재 미분말이 혼입되어 있는 것으로 나타났다.

2) 재생시멘트 모르타의 물성

그림 5는 예비가열 조건에 따른 재생시멘트 모르타의 플로우를 나타낸 것으로, 전체적으로 예비가열을 한 경우의 플로우가 높게 나타났으나 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 이는 0.15mm 통과 미분말은 시멘트와 골재 미분이 동일하게 분체로서 거동하기 때문인 것으로 사료된다.

또한, 압축강도 실험결과에서도 300℃ 120분 5회 예비가열을 한 경우, 무가열에 비하여 20% 강도증진을 하였으나, 타가열조건에서는 큰 차이가 없었다.

이러한 결과는 전술한 바와 같이, 예비가열로 인하여 잔골재와 페이스트의 계면분리효과는 우수하였으나, 모재 모르타 중 0.15mm 이하의 잔골재 미분이 혼합되어 있기 때문인 것으로 판단되며, 향후 모재 모르타의 잔골재율과 배합에 따른 강도성상에 관한 추가적인 고찰이 필요하다.

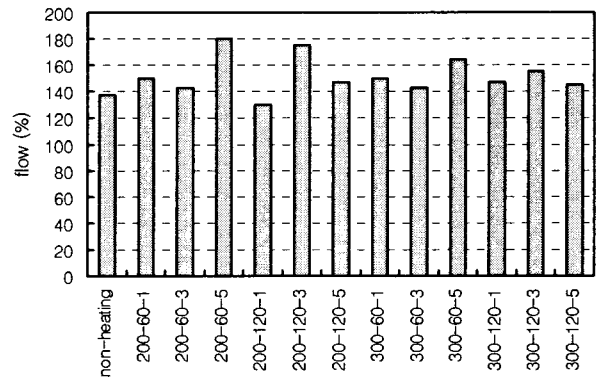


그림 5. 재생시멘트 모르타의 플로우

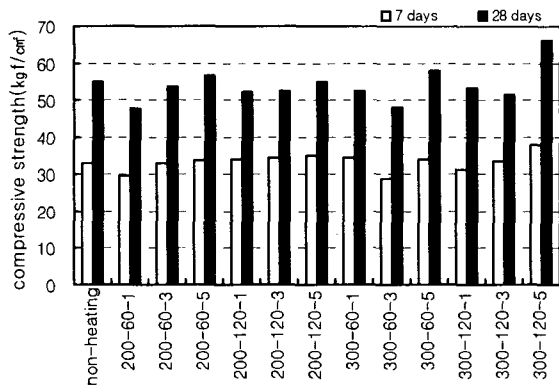


그림 6. 재생시멘트 모르터의 압축강도

4.2 재생골재와 모르터의 계면 분리

예비가열에 의한 굵은골재와 모르터의 계면분리효과의 실험결과는 표 7과 같다.

표 7. 실험결과표 (재생골재)

조건	비중			흡수율 (%)	재생골재성분(%)			
	절건 비중	표건 비중	겉보기 비중		mortar	5-10 mm	10-15 mm	15-20 mm
non-heating	2.28	2.43	2.60	5.10	42.3	4.6	42.2	10.9
200- 60-1	2.40	2.50	2.68	4.26	35.4	3.8	44.4	16.5
200- 60-3	2.35	2.47	2.66	4.74	42.1	3.8	42.5	11.5
200- 60-5	2.40	2.51	2.69	4.13	31.9	3.7	43.9	20.4
200-120-1	2.39	2.52	2.70	4.33	29.5	3.4	49.0	18.2
200-120-3	2.40	2.50	2.66	3.98	38.3	3.5	42.7	15.4
200-120-5	2.42	2.51	2.67	3.77	34.6	3.4	45.7	16.3
300- 60-1	2.39	2.50	2.67	3.95	33.6	3.2	47.3	15.9
300- 60-3	2.40	2.49	2.65	3.73	29.4	3.3	49.4	17.8
300- 60-5	2.37	2.48	2.66	4.41	32.8	2.2	44.0	21.0
300-120-1	2.46	2.53	2.70	3.96	31.7	3.4	42.5	22.4
300-120-3	2.44	2.53	2.70	3.87	30.6	2.9	43.6	22.9
300-120-5	2.48	2.56	2.72	3.51	27.4	2.7	43.4	26.5

1) 할열과피에 의한 계면분리효과

예비가열에 따른 골재와 모르터의 계면분리 특성을 고찰하기 위하여 예비가열을 행한 콘크리트 시험체를 할열과피 후 표면에 페놀프탈레인 용액을 분무한 결과는 그림 7과 같다.

실험결과, 예비가열을 하지 않은 경우에 비하여 200℃, 300℃로 예비가열을 한 경우 골재와 모르터 계면의 취약화에 의하여 골재표면의 모르터 부착분의 분리가 용이하였다. 특히, 가열과 냉각을 반복할수록 수축팽창효과가 극대화되어 300℃ 120분 가열조건에서 가열과 냉각을 5회 사이클로 행한 경우 굵은골재와 모르터 부착계면의 분리경향은 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 가열온도에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

2) 염산용해법에 의한 모르터 부착율 측정

재생굵은골재 내 부착된 모르터의 양을 정량화하여 예비가열 조건에 따른 골재 계면 분리효과를 측정한 결과는 그림 7, 그림 8, 그림 9와 같다.

그림 7의 f)와 같이 재생 굵은골재 1~15mm 400g, 15~20mm 500g을 염산 45% 농도의 염산 용액에 투입하였다. 예비가열 처리를 하지 않은 경우 재생골재량의 약 40% 가량이 모르터로 구성된 것으로 나타났으며, 재생골재의 55% 가량을 차지하는 15~20mm의 골재량이 약 80% 감소한 것으로 나타났다. 그러나, 예비가열 처리를 한 경우 재생골재 중 모르터량은 크게 감소하였으며, 특히 300℃의 경우 120분 5회 사이클에서 모르터 부착율이 27.4%로 낮게 나타났다.

본 연구에서는 실험여건상 현재까지의 가장 최적화된 제조 프로세스를 통하여 재생골재를 제작한 것이 아니므로 재생 굵은골재에 부착된 모르터량이 기존 재생골재에 비하여 비교적 큰 것으로 볼 수 있으나, 예비가열에 의한 계면 분리효과를 확인할 수 있었다.

3) 재생골재의 비중·흡수율

현재 개발 및 실용화단계에 있는 재생골재는 부착 모르터의 영향으로 비중이 천연골재에 비하여 10~20% 정도 낮으며, 흡수율이 천연골재보다 3~5배 정도 높은 특성을 가지고 있다.⁵⁾ 또한, 흡수율 5% 이상의 재생 굵은골재를 사용한 재생 콘크리트는 탄성계수가 낮아져 주요구조물에서의 적용이 어렵게 된다.⁶⁾

예비가열 조건에 따른 재생 굵은골재의 비중과 흡수율은 그림 10, 11과 같다.

실험결과, 재생골재의 비중은 예비가열을 행한 경우가 높게 나타났으며, 소성온도가 높을수록 그 차이는 컸다. 또한, 재생골재의 흡수율은 예비가열을 하지 않은 경우 5% 이상으로 나타나 건설교통부의 「건설폐기물처리 및 재활용 요령」 기준의 3종 재생골재에 해당하였다. 그러나 200℃와 300℃ 120분 5회 사이클 가열시 흡수율은 4% 이하로 나타나 2종 재생골재의 품질을 나타내었다. 특히, 가열·냉각 사이클이 반복된 경우가 더욱 우수한 품질을 나타내어, 현 재생골재 제조 시스템에의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 재생 시멘트의 품질관리 실험 중 SEM 결과에서 나타난 바와 같이 반복된 예비가열로 인하여 골재에 부착된 모르터 입자의 분리가 용이하게 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 흡수율이 낮고 부착강도가 증진된 재생골재를 이용할 경우 콘크리트의 유동성 및 강도성상에 많은 개선효과가 있을 것으로 사료된다.

그림 12와 그림 13은 모르터 부착율에 따른 재생 굵은골재의 제반 물성의 상관관계를 나타낸 것이다.

회귀분석 결과, 예비가열에 의해 재생 굵은골재 내 모르터 부착율이 감소함에 따라 흡수율은 감소하며 상대적으로 비중이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 재생 굵은골재의 비중과 흡수율과의 상관성도 높은 것을 알 수 있다.

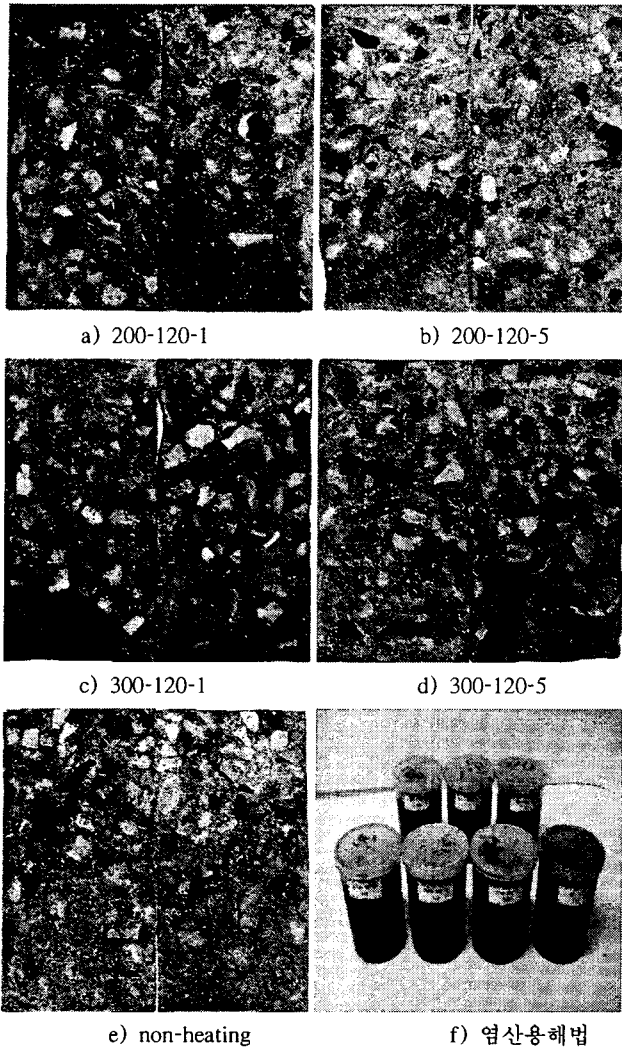


그림 7. 모르터와 굵은골재의 계면분리 (페놀프탈레인 용액)

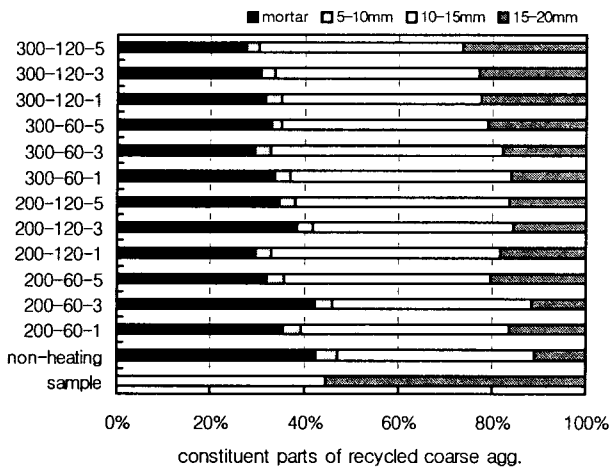


그림 8. 재생 굵은골재의 성분 중량비 (염산용해법)

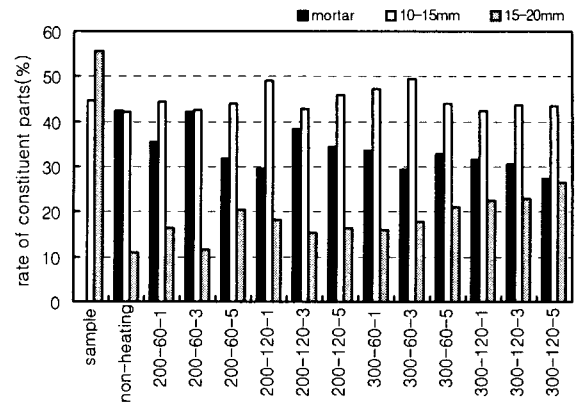


그림 9. 잔류골재비율 (염산용해법)

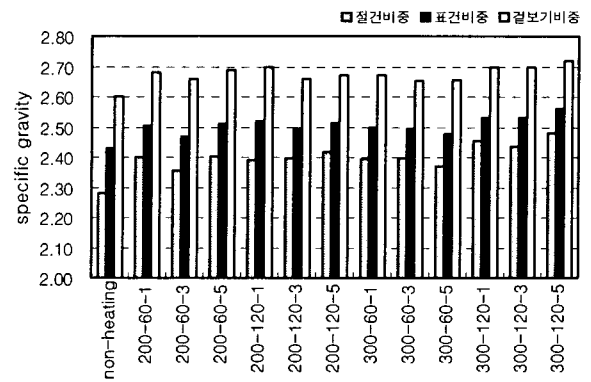


그림 10. 재생 굵은골재의 비중

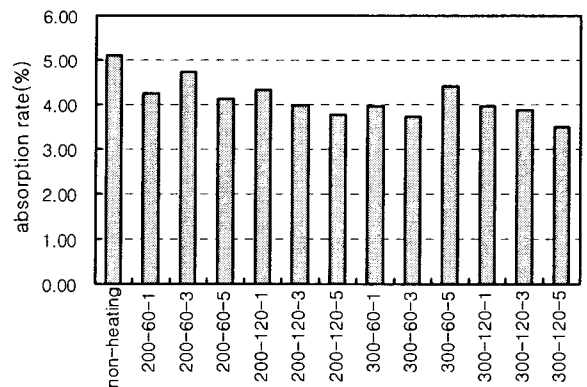


그림 11. 재생굵은골재의 흡수율

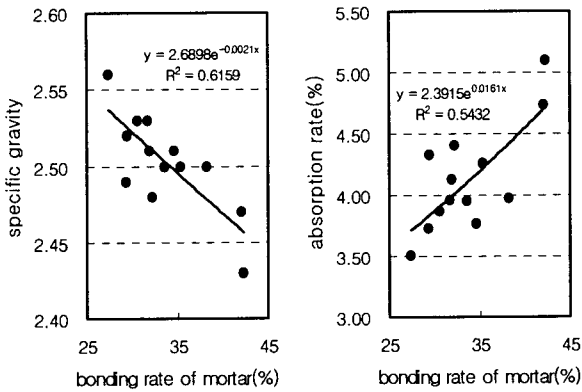


그림 12. 모르터 부착율에 따른 재생골재의 물성

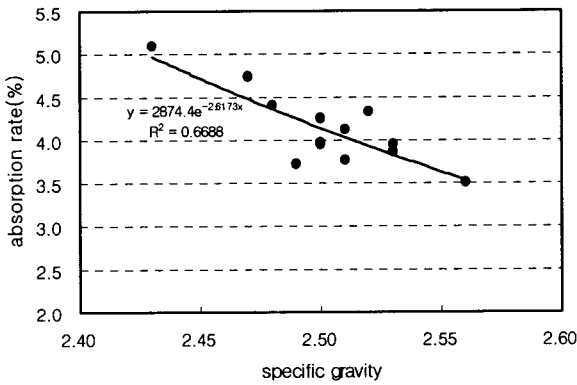


그림 13. 재생골재의 비중과 흡수율의 상관성

향후, 본 연구의 결과를 토대로 현재 실용화 단계에 있는 재생 굵은골재의 제조 시스템에 적용시 우수한 품질관리 효과가 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 吳相均·安宰徹 外, 韓國での建設廢棄物の發生量とリサイクルに關する考察, 日本建築學會大會學術講演便概集, 2002年8月, pp.991-992
2. 吳相均·安宰徹 外, セメントモルタルの加熱粉碎による再生セメントへの再利用, 日本建築學會大會學術講演便概集, 2002年8月, pp.993-994
3. 강병희, 초음파에 의한 고온수열콘크리트의 강도추정에 관한 실험적 연구, 한양대학교 박사학위논문, 1989.
4. 박승범, 건설폐기물의 국내의 재활용기술의 현황 그리고 처리 및 재활용 실태, 콘크리트학회, 2000. pp.46-53
5. 김무한, 재생골재의 현황 및 재활용방안, 콘크리트학회지 제9권 6호, 1997. 12, pp.15
6. 송하원, 폐콘크리트로부터 재생된 골재의 합리적 평가에 관한 연구, 콘크리트학회논문집 제12권 5호, 2000. 10., pp.3-12
7. 윤재환, 포틀랜드 시멘트 및 콘크리트, 세진사, 1990.
8. 原田 有, 建築耐火構法, 工業調査會, 1973.

5. 결 론

폐콘크리트의 재활용을 위한 골재 계면분리의 효율적 방법을 제시하기 위하여 상기와 같은 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재생시멘트의 경우 계면분리는 용이한것으로 나타났으나, 잔골재에 포함된 미분의 혼입량은 크게 감소하지 않는 것으로 나타났다. 향후 재생시멘트로의 재활용이 가능한 완전순환형 콘크리트의 개발시 잔골재 입도분포에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 2) 재생 굵은골재의 경우 예비가열에 의한 골재 계면분리효과가 우수하였으며, 특히 300℃ 120분 5회 사이클 가열시 모르터 부착율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이때, 흡수율은 3.51%로 재생골재 2급의 규준을 만족하였으며, 재파쇄(refining)에 의한 제조시스템을 이용한다면 1급 재생골재의 생산이 가능해질 것으로 판단된다.
- 3) 염산법에 의하여 재생 굵은골재에 부착된 모르터량의 정량적 분석이 가능하였으며, 부착 모르터량과 재생골재의 제반 물성과의 상관관계가 높은 것으로 나타났다.