

방사화 콘크리트로부터 굵은골재 분리 공정개발

Development of coarse aggregate separation process from radiated concrete



김영안 Young-Ahn Kim
하나케이텍(주)
기술연구소 연구소장
E-mail : kain73@naver.com



신재상 Jae-Sang Shin
하나케이텍(주)
기술연구소 주임연구원
E-mail : premier0108@gmail.com

1. 머리글

방사화 콘크리트의 재활용 비율을 높이기 위해서는 우선 재생골재의 품질 및 콘크리트 폐기물로부터 방사성 물질을 획기적으로 제거할 수 있는 감용의 기술개발이 선행 되어야 한다. 감용은 크게 물리적 감용과 화학적 감용으로 분류할 수 있다.

방사화 콘크리트 폐기물의 방사성 물질을 제거하기 위해서는 골재의 표면에 부착된 시멘트 페이스트/페이스트를 골재의 품질을 손상시키지 않고 분리하느냐가 핵심적인 요건이다.

이에 본 고에서는 물리적 감용을 이용하여 방사화 콘크리트로부터 파쇄된 굵은골재 표면의 시멘트 페이스트를 분리하여 제조된 굵은골재의 공정개발에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 방사화콘크리트로부터 굵은골재 분리

2.1 실험개요

감용기술에 대한 실험은 <그림1>과 같이 총 3가지의 장비를 사용하였으며, 각 장비의 가동시간은 초음파발생기 1시간, Microwave 발생기 3분, 열처리장비는 최고온도 600℃, 2시간으로 고정하였으며 원자력 발전소의 콘크리트 배합설계([표 1])로 제작한 콘크리트 시험체의 파쇄/마쇄과정을 거친 굵은골재를 사용하였다.



<초음파발생기>

<Microwave 발생기>

<열처리 장비>

그림 1. 굵은골재 분리를 향상을 위한 실험장비

[표 1] 시험체 배합상세

Strength (psi)	Type	W/(C+P) (%)	Water (lb)	Cement (lb)	FA (lb)	Sand (lb)	Aggregate (lb)	Admixture (ml)		s/a (%)
								WRA	AEA	
3,000	1종	62.1	278	448	0	1,359	1,657	813	31	45

2.2 실험결과

각 장비의 실험은 5차례 진행하였으며, 중량적인 방법을 통해 페이스트의 분리율을 확인하였다.

초음파발생기를 이용한 방법의 중량 감소율 측정은 13.1~19.0g 범위로 총 골재 중량대비 약 1.75%의 분리율을 보이며, Microwave 발생기를 이용한 실험은 10.6~18.20g 범위로 총 골재 중량대비 약 1.51%의 분리율을 보이는 것을 확인하였다.

마지막으로 열처리기법은 온도의 변수를 총 세가지(500℃, 600℃, 700℃)로 하여 실험을 진행하였고, 각 변수의 중량감소량은 [표 2]와 같이 9.4~18.5g, 24.6~53.4g, 24.5~54.5g으로 나타났으며, 페이스트의 분리율은 1.35%, 3.59%, 3.90%로 확인하였다.

열처리기법의 경우 유지하는 온도를 높일수록 효과는 증가하는 것을 확인하였지만 전체적인 효과는 만족스럽지 못하였다.

가열에 의한 안정된 재생골재를 회수하기 위해서는 시멘트 수화물이 탈수되지만 점토광물의 탈수 및 석영의 결정전이가 일어나지 않도록 600℃ 이하에서 가열한 후 마쇄하는 것이 유리하다.

세 변수의 조건중에서 700℃를 유지하는 방법이 효과가 가장 뛰어나지만, <그림 2>와 같이 600℃를 유지하여 실험하는 것이 실험의 효율적인 측면이 높을 것으로 판단하여 추가적으로 시험체의 열처리 후 골재의 파쇄가 일어나지 않을 정도의 마쇄과정을 진행하여 추가 실험한 후 실험 전후의 중량적 변화를 확인하여 분리율을 확인하였다.

[표 2] 굵은골재 분리기술을 적용한 실험결과

구분	분리실험 전 중량	분리실험 후 중량	감소율 (%)	
초음파 발생기	1	1012.2	993.8	1.82
	2	1006.6	987.6	1.89
	3	1010.3	997.2	1.30
	4	1007.8	988.9	1.88
	5	1008.1	989.1	1.88
	평균	1009.0	991.3	1.75
Microwave 발생기	1	1007.2	993.8	1.33
	2	1002.7	992.1	1.06
	3	1008.4	990.2	1.80
	4	1010.1	992.7	1.72
	5	1012.2	995.8	1.62
	평균	1008.1	992.9	1.51
열처리 기법 (500℃)	1	1001.8	988.7	1.31
	2	1003.2	993.8	0.94
	3	1003.7	985.2	1.84
	4	1002.5	989.1	1.34
	5	1004.7	991.4	1.32
	평균	1003.2	989.6	1.35
열처리 기법 (600℃)	1	1008.1	983.5	2.44
	2	1011.5	958.1	5.28
	3	1009.6	981.8	2.75
	4	1012.7	966.7	4.54
	5	1006.3	976.8	2.93
	평균	1009.6	973.4	3.59
열처리 기법 (700℃)	1	1005.5	971.6	3.37
	2	1008.2	955.8	5.20
	3	1010.9	956.4	5.39
	4	1006.8	982.3	2.43
	5	1004.4	973.1	3.12
	평균	1007.2	967.8	3.90

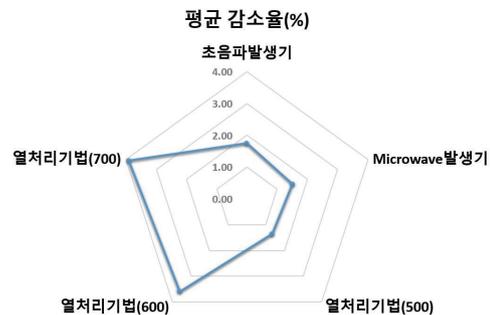


그림 2. 굵은골재 분리율 기법의 모르타르 평균 감소율(%)

[표 3] 열처리 후 마쇄방식을 적용한 실험결과

구분	분리실험 전 중량	분리실험 후 중량	감소율 (%)	
열처리 후 마쇄방식	1	1004.9	794.3	20.96
	2	1001.1	774.7	22.62
	3	1001.9	788.1	21.34
	4	1003.9	797.6	20.55
	5	1009.7	783.4	22.41
	평균	1004.3	787.6	21.6

600℃를 유지하여 열처리를 한 후 추가로 마쇄단계를 진행한 굵은골재의 페이스트 중량감소량은 [표 3]과 같이 206.3~226.4g 범위로 총 골재 중량대비 약 21.6%의 분리율을 나타내는 것을 확인하였다.

열처리 후 굵은골재 표면 페이스트의 부착력이 약화되고 추가적인 마쇄단계를 거쳤을 때 분리율 향상에 도움을 주는 것을 확인하였다.

3. 감용기술에 대한 검증 및 신뢰성 평가

3.1 파쇄 및 마쇄

콘크리트 파쇄는 파쇄방법과 횡수에 따라 파쇄 후의 입도 분포가 현저히 영향을 받는다. 파쇄 입도 조절이 중요한 이유는 Jaw plate 간격이 굵은 골재 최대치수보다 작은 경우, 골재와 페이스트 계면에서 최대치수보다 작은 경우, 골재와 페이스트 계면에서 파쇄가 되기보다는 골재 자체가 깨지는 비율이 높아져 재활용 할 수 있는 골재의 품질이 저하되고 골재 미분말이 다량으로 발생하게 된다.

19회의 검증실험(1회 실험 시 약 4L 용적의 콘크리트 시험체 사용)을 통해 파쇄 후 시료의 입도분포를 분석하였다.(<그림 3>). 각각의 입도분포는 유사한 경향을 나타내었으며, 5~19mm(굵은 골재)와 0.15~5mm(잔골재), 0.15mm 이하 미분말은 평균적으로 55.65%, 39.69%, 4.68%의 비율로 나타났다.

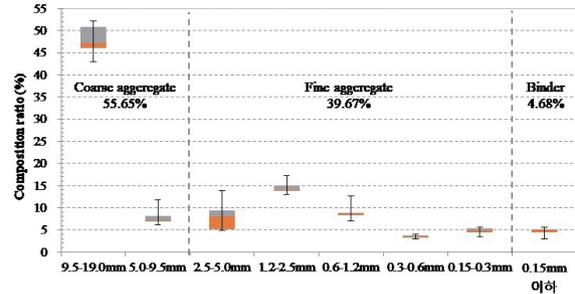


그림 3. 파쇄/마쇄 성능검증 실험결과(19회)

3.2 골재표면 부착 페이스트 제거기술

감용기술이 적용된 굵은 골재를 임의로 선택하여 분석하기 때문에 동일 시료에서도 편차가 생긴다. 감용율의 객관적인 평가를 위해 기술별로 1kg 단위의 산침지 실험을 수행하였다. 시멘트 페이스트 부착 양 평가를 위한 황산 수용액의 농도는 20%로 하였으며, 황산 수용액과 파쇄 시료(잔골재)와의 비율은 10:1(중량비)로 하였다. 황산 20% 수용액에 침지하는 골재는 고온의 건조로에서 절건 한 후 질량을 측정하였으며, 침지 재령이 경과한 이후에는 거름종이를 이용하여 잔존 시료와 수용액을 분리한 후 절건하여 질량 변화를 평가하였다. CT 분석/산침지 방식을 적용한 감용기술에 따른 굵은 골재 표면 부착 페이스트량 평가결과는 [표 4], <그림 4>에서 보는바와 같다.

3.3 감용율 평가

원전콘크리트 배합설계로 제작한 콘크리트 시험체의 파쇄, 마쇄, 열처리 공정을 통하여 감용·재활용 기술의 성능을 평가하였다.(공인시험기관 입회실험)

성능평가결과는 페이스트 부착율을 평가하였으며, 열처리 + 마쇄과정을 적용하였을시 굵은 골재 페이스트 부착율은 0.026으로 나타났다. 이를 자체분석하여 감용율을 분석하였을시, [표 5]에서 보는 바와 같이 총 감용율은 99.07%로 산정되었다.

[표 4] X-ray CT 분석을 통한 굵은 골재의 페이스트 부착율(%)

No.	원재료		열처리		Microwave		24hr 마쇄		초음파	
	CT 분석	산침지	CT 분석	산침지	CT 분석	산침지	CT 분석	산침지	CT 분석	산침지
1	0.0	0.0	16.1	24.9	0.7	0.0	0.0	0.1	5.0	6.6
2	33.7	40.3	25.6	29.1	0.6	0.0	0.9	0.4	2.0	2.2
3	5.5	6.5	16.4	18.9	11.1	16.5	1.4	0.1	6.5	13.7
4	24.6	35.5	25.4	28.8	6.8	11.7	1.2	0.4	7.9	10.9
평균	15.9	20.6	20.9	25.4	4.8	7.1	0.9	0.2	5.4	8.4
편차	4.7		4.5		2.3		-0.6		3.0	

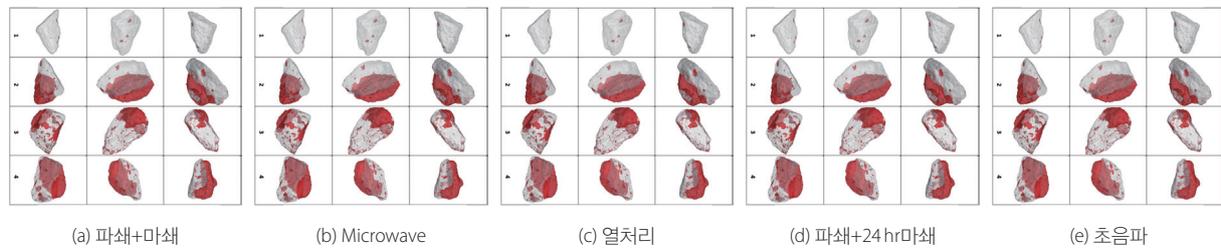


그림 4. X-ray CT 분석을 통한 굵은 골재 부착 페이스트량 평가

[표 5] 최종 감용율 산정 결과

구분	감용대상 굵은 골재 비율 (A/C)	단계별 감용율 (중량감소율) (B)	굵은골재 모르타르 부착율 (D)	최종 감용율 (%) $\left(\left(1 - \frac{A}{C} \times (1 - B) \times D \right) \times 100, \% \right)$
열처리+마쇄방법	0.5565	0.3563	0.0259	99.07
평가방법	자체실험결과	공인시험성적서		자체분석결과

3.4 분리된 굵은골재 품질 성능 검증

최종 개발된 굵은 골재 분리기법을 적용한 표면의 페이스트가 제거된 순환골재에 대하여 원자재시험성적을 의뢰하여 콘크리트용 순환골재의 품질기준을 만족하는지 평가하였다 ([표 6]). 최종 개발된 굵은 골재의 원자재 시험결과는 모든 항목에 관하여 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 콘크리트용 순환골재로서의 사용이 가능하다는 것을 확인하였다. 생산된 순환 굵은 골재를 콘크리트 배합(원전 배합)에 적용하여 압축강도 평가를 통하여 성능검증을 하였고 비교평가를 위하여 천연골재를 적용한 시험체를 함께 제작하여 성능을 비교하였다([표 7]).

콘크리트용 시험체의 압축강도는 초기강도 및 7일 강도까지는 최종 개발된 순환 굵은 골재를 적용한 콘크리트용 시험체의 압축강도가 다소 낮은 경향이 있으나 최종 28일 강도에

[표 6] 콘크리트용 순환골재의 품질기준(KS F 2573-2002)

구분	항목	단위	순환 굵은골재 기준	개발 기술 성적서 결과
	흡수율	%	4.0 이하	1.32
	절대건조밀도	g/cm ³	2.3 이상	2.61
	마모감량	%	40 이하	20.1
	입자모양판정실적률	%	55 이하	57.8
	0.08mm체 통과량	%	1.0 이하	0.3
	점토 덩어리	%	0.2 이하	0.0
이물질 함유량	유기(용적)	kg/L	1.0 이하	0.1
	무기(질량)	%	1.0 이하	0.3

[표 7] 원전 배합이 적용된 콘크리트 시험체의 압축강도

구분	압축강도 (MPa)		
	3일	7일	28일
천연골재 콘크리트	20.7	28.9	32.9
개발기술 적용 순환골재 콘크리트-1	18.7	26.0	31.3
개발기술 적용 순환골재 콘크리트-2	20.4	27.1	33.0

서는 크게 차이가 나지 않았다. 원전해체 콘크리트용 순환 굵은 골재의 안정성 입증과 사용규제/해제에 따라 사용하는 것은 가능할 것으로 판단된다.

4. 분리공정 절차화

방사화 콘크리트로부터 골재를 분리하여 제조되는 순환 골재에 대한 처리 및 요구사항을 만족시키기 위하여 제조설비의 규격, 특성, 제조공정, 시험 및 검사 등 전반적인 사항을 규정하는 것을 목적으로 공정을 절차화하는 것이 필요하다.

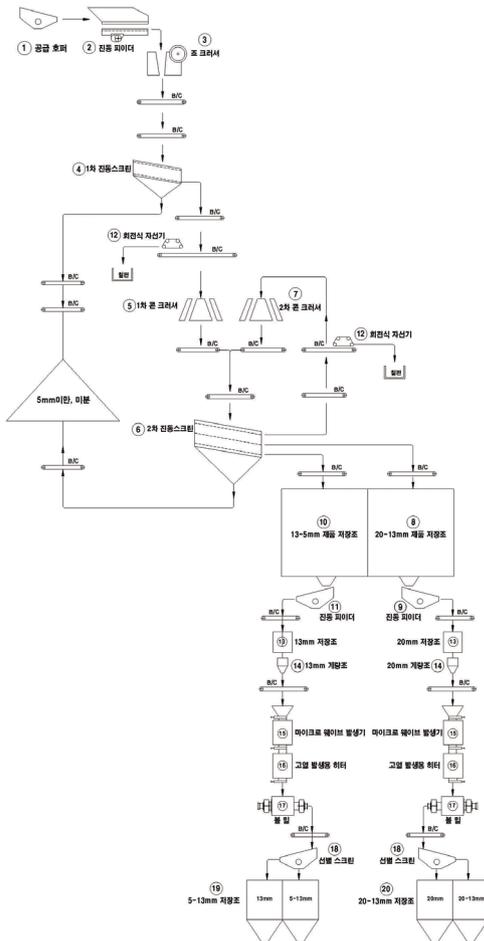


그림 5. 골재 분리 Flow Sheet

공정의 절차화는 골재를 분리하는 제조공정에서 품질 및 환경, 작업자의 안전보전에 영향을 미치는 모든 제조공정의 관리방식을 규정함으로써 공정의 안정화와 품질확보를 확보하는데 있다.

기존의 콘크리트 처리 공정을 활용하는 투입/파쇄/이물질 분리 및 골재선별공정 중 바람과 물을 이용한 공정은 방사능의 확산 및 2차 폐기물이 발생하는 문제점이 있어 배제하고 연구를 통해 개발된 감용기술을 적용하여 골재 분리공정 및 장치에 대한 절차화 및 설계도를 개발하였다.

현재 <그림 5>에서 보는 바와 같이 개발된 공정 및 설계는 초안으로 작성된 것으로, 필요한 처리용량에 따라 방사화 콘크리트로부터의 골재 분리 기법을 병렬식으로 추가 증설하여 처리용량을 늘릴 수 있도록 하였다.

<절차서 목차>

1. 개요
 - 1.1 목적
 - 1.2 적용
 - 1.3 참조
 - 1.4 정의
 - 1.5 책임
 - 1.6 주의 및 제한사항
2. 절차
 - 2.1 생산 계획 수립
 - 2.2 생산준비 및 유지관리
 - 2.3 설비의 구성 및 성능
 - 2.4 작업지시 및 감독
 - 2.5 생산 공정
 - 2.6 이상발생 시 조치사항
 - 2.7 점검 및 정비
 - 2.8 검사
 - 2.9 운전 안전 수칙

5. 분리된 굵은 골재의 재활용 기술

본 연구에서는 콘크리트 폐기물에서 생산된 순환골재를 활용하여 원전해체 부지 등에서 사용할 수 있는 차폐블록과 같은 콘크리트 2차 제품의 생산을 통하여 자원을 재활용 하는 방안을 수립하였다. 최적배합을 바탕으로 원전 해체시 발생하는 절단 블록을 통하여 제조된 순환골재를 활용하여 콘크리트 차폐블록을 개발 및 설계하여 디자인 특허의 등록 및 친환경 인증(환경마크)을 취득하였다.

차폐블록의 디자인은 다음 <그림 6>에서 보는 바와 같이 총 2가지 TYPE으로 설계되었으며, 시작품 생산에 적용할 배합설계(습식)를 하고 몰드를 제작하여 시작품을 개발하였다(<그림 7>).

1TYPE			
사시도		단면도	
우측면도			
2TYPE			
사시도		단면도	
우측면도			

그림 6. 콘크리트 차폐블록 디자인도면



(a) 콘크리트 차폐블록 시작품

(b) 시작품 적층 사진

그림 7. 콘크리트 차폐블록 시작품

6. 맺음말

방사화 콘크리트가 포함된 폐기물은 제염과 감용처리 등의 과정을 통해 방사화 부분을 제거하고 재활용하며, 제염 및 감용처리 이후의 재활용 방법은 일반 폐콘크리트의 재활용 방법과 동일하다. 일반적으로 폐콘크리트는 대부분 도로 기층과 성토, 뒤채움용으로 사용되며, 새로운 콘크리트와 콘크리트 2차 제품에 사용되는 비율은 약 9%에 불과한 실정이다.

대량발생 콘크리트 폐기물의 고부가가치 재활용 방안 수립을 위하여, 비방사화 콘크리트와 더불어 방사화 콘크리트도 감용기술을 통하여 충분히 친환경 인증에 부합 가능한 순환골재로 재활용 할 수 있으며, 순환 골재의 등급에 적합한 강도별 사용용도를 개발하여 콘크리트 2차 제품에도 확대하여 적용할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20161510300420)

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, "콘크리트 폐기물의 부피감용 기술 분석 보고서"
2. 해체 콘크리트 폐기물 감용 및 재활용 기술현황, 한국원자력연구원, 2008
3. 원자력안전법, 원자력안전법 시행령, 원자력안전법 시행규칙
4. 순환골재 품질기준(국토교통부공고 제 2017-711호)

담당 편집위원 : 최명성(단국대학교)