

제지 슬러지 소각회를 이용한 인공골재 생산공정개발

Development of Product System on Artificial Aggregate using of Paper Sludge Ash

백 명종*
Baeg, Myung-Jong

박 칠림**
Park, Chil-Lim

소 양섭***
Soh, Yang-Seob

ABSTRACT

This studies regarding development of product system on artificial aggregate using of Paper Sludge Ash that waste production at paper-making mill. expecially this paper discribes development of product system using centrifugal mixer plant. The skills of this product system on artificial aggregate using of Ash can be spread Fly-Ash, powder and fine aggregate(under 5mm) of waste concrete reuse.

1. 서 론

제지 슬러지 소각회(Paper sludge ash ; 이하 소각회라 함)는 제지 공정중 발생하는 산업폐기물로서, 그 배출량이 최근에 크게 증가하고 있는 추세에 있다. 이 같은 결과는 제지업체의 종이생산량이 급증한 것과, 기존의 슬러지를 단순매립하던 방식에서 소각을 통해 부피를 감소시켜 소각회로 최종처리하는 방식으로의 전환에 따른 것으로 보인다.

제지 업체에서는 소각회의 처리비용이 가중됨에 따라 재활용의 가능성을 적극적으로 검토하여 슬러지를 이용한 보-드생산, 제오라이트등에의 이용, 벽돌·블럭 등의 건자재 생산에 소각회를 이용하는 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구는 소각회를 활용한 골재를 개발하기 위해 시작된 연구로 소각회의 특성을 고려한 재활용방법을 제시하고자 골재제조가능성을 시험한 것이다. 소각회의 골재제조가능성에 대한 연구는 고온환경하에서 소성 및 용융연구가 몇몇 국가를 중심으로 이루어 졌으나, 본 연구에서는 상온경화형 골재제조방안을 제시하기로 한다. 소각회를 이용한 상온경화 골재 제조 기술 및 안정적 품질이 확보될 경우 이의 응용을 통하여 유사한 각종 소각회 등의 골재로서의 재활용이 가능하여 기술적인 파급효과가 매우 크다고 할 수 있다.

이러한 배경에 따라 당 연구진은 10여전부터 소각회에 대한 재활용 연구에 관심을 가지고 연구를

* 정회원, 주)대우건설기술연구소 주임연구원

** 정회원, 주)대우건설기술연구소 연구소장, 부사장

*** 정회원, 전북대학교 건축공학과 교수

수행해왔고, 96년도에 환경부 G-7 환경공학기술개발과제로 선정됨에 따라 안정적인 연구가 가능하였다. 본 논문은 과제의 1차년도 수행결과중 골재제조공정개발 및 소각회의 기초적인 특성에 대해 검토한 결과이다.

본 연구에서는 소각회를 이용한 상온경화형 골재 개발을 위한 소각회에 대한 기초적 자료수집과 분석을 실시하는 한편, 상온에서의 골재제조공정을 확립하고자 한다.

2. 본론

2.1 제지 슬릿지 소각회 배출현황 조사

현재 국내에서의 제지 슬릿지 소각회의 배출현황을 조사하기 위해 업체의 면담 및 방문을 통해 조사한 결과를 표 1.에 나타내었다. 국내에서는 현재 약 160여개의 제지업체가 영업활동을 하고 있으며, 연간 종이생산량은 90년대이후 꾸준한 증가를 보여 97년도를 기준으로 할 때 약 900만톤에 이르고 있다. 이 가운데 슬릿지로 배출되는 양은 종이생산량의 13~15%에 이르는 126만톤(97년도 기준)정도로 추정되고 있으며, 소각회의 배출량은 슬릿지 배출량의 17~20%에 이르는 22.3만톤(97년도 기준)로 조사되었다. 이와 같은 소각회의 배출량은 종이생산량의 2.6%에 해당하는 것으로서 연간 제지업체가 부담하는 처리비용은 약 110억원정도로 추정되고 있다.

표 1. 제지 슬릿지 소각회의 배출현황 조사 결과 (단위 : 만톤)

연도 분류	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	2000
종이생산량	452	492	550	580	643	688	757	900	1000
슬릿지 배출량	63.28	68.6	77.0	81.2	90.0	96.3	105.98	126	140
소각회배출량	11.7	12.7	14.2	15.0	16.7	17.81	19.60	23.4	50

한편, 향후 2000년대에는 제지업체의 소각로 설치추세가 지속적으로 이루어져 종이생산량의 5%인 50만톤이상이 소각회로 배출될 것으로 추정된다.

2.2 제지 슬릿지 소각회의 특성 조사

제지 슬릿지 소각회의 재활용을 위해서는 소각회의 특성을 파악하여야 한다. 소각회의 특성에는 물리적, 화학적, 중금속 용출특성 등에 대해 검토를 실시하였다. 조사분석방법은 시료를 채취하여 조사기관인 보건연구원에 의뢰하여 그 결과를 분석하였다.

2.2.1 물리적 특성

표 2.에 H사의 소각회의 물리적 특성을 플라이 애쉬와 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 제지 슬릿지 소각회는 플라이 애쉬와 비교하여 입자크기가 더 크고 비표면적이 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 제지 슬릿지 소각회의 소각온도가 비교적 낮은 원인으로 보인다. 그러나, 최근에는 새로운 소각로가 도입되어 소각온도가 높아져 소각회의 입자형태가 구상으로 많이 향상된 것으로 보인다. 소각회의 입자형태는 관상과 막대모양으로 거칠며 비중은 진비중은 2.45, 벌크비중은 0.51로 낮게 나타났다. 참고로 제지 슬릿지 소각회의 용융점은 1,318로 나타났다.

2.2.2 화학적 특성

표 3에 2종류의 소각회의 화학적 특성을 플라이 애쉬와 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 소각회의 종류별로 화학적 특성이 다르게 나타나고 있는데, 이는 용지의 종류가 다른것에 기인하는 것으로 판단된다. 인쇄용지는 $SiO_2+Al_2O_3+CaO+MgO$ 의 주요 4성분의 함유량이 95%인데 비하여 골판지의 소각회는 67%로 낮게 나타나고 있다. 특히 골판지 소각회의 강열감량이 현저하게 높은데 이러한 미연소탄분은 결합재의 선정에 영향을 미치게 된다. 미연소탄분은 목재의 특성을 지니고 있으므로 결합재에는 현재 목재계 접착제로 많이 활용되고 있는 멜라민 수지가 적합하다고 판단되었다.

표 2. 물리적 특성

성분	Particle Size (μm)	Particle Type	Crystal Structure	Relative Specific Area(cm^2/g)	Specific Gravity	Melting Point($^{\circ}C$)
H 사	19.61 ± 0.2	Plate Whisker	Quartz Rutile	3,370	Ture:2.46 Bulk:0.51	1,318
플라이 애쉬	9.0 ± 0.2	Cenosphere	Quartz Rutile	3,500	2.17	-

표 3. 화학적 특성

성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	Ig.Loss	비고
H 사	45.82	28.23	1.10	11.70	9.57	0.42	0.66	1.60	0.75	인쇄지
J 사	22.20	21.76	7.24	17.23	5.62	0.82	1.47	6.31	17.35	골판지
플라이 애쉬	56.56	27.76	7.04	2.70	1.14	0.59	0.35	0.49	3.37	정제

2.2.3 용출 특성

표 4에 2종류의 소각회의 용출특성을 허용치와 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 일부 중금속의 검출이 확인되기는 했지만 소각회의 종류별로 대부분 허용치 이내로 나타나 업체에서 배출된 소각회는 그 자체로 재활용하는데에는 큰 문제는 없다고 판단된다. 그러나, 최근 일부 소각장에서 배출된 소각회는 중금속의 함유량이 기준치를 훨씬 초과하고 있어 사회적 문제가 되고 있다. 소각회의 재활용을 검토할때는 이러한 중금속 용출특성을 감안하여 용출이 되지 않는 방안을 강구해야 한다. 본 연구에서는 소각회자체도 용출이 큰 문제는 되지 않을 것으로 판단되나, 골재로 만들어졌을때에도 수지가 소각회를 완전히 밀봉시키는 효과를 발휘하기 때문에 더욱 안정적인 용출저감이 가능하다.

표 4. 용출특성조사결과

성분	Cu	Cd	Pb	CN	Hg	Cr^{6+}	As	유기인	기타 (T.C.A)
H 사	0.006	0.011	0.068	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
J 사	불검출	0.011	0.597	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
허용치(mg/l)	3	0.1	3.0	1.0	0.005	1.5	1.5	1.0	0.1,0.3

2.3 상온 골재생산 공정기술연구

소각회를 이용한 상온 골재생산 공정기술개발은 소각회의 재활용을 위해서 사용되는 에너지의 투입량을 최소화하는데 그 목적이 있다. 기존의 외국의 소각회 골재생산 공정은 고에너지 투입이 문제가 되고 있으며 그에 따른 환경오염도 적지 않다고 지적되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소각회의 특성에 적합한 결합재의 선정과 구상의 형상을 갖는 골재의 상온제조공정을 개발하였다.

2.3.1 사용재료검토

1) 사용재료의 역할 및 특성 검토

본 연구에서 사용된 재료는 제지슬러지 소각회, 멜라민 수지, 수지 경화제, 물, 시멘트, 잔골재등이며 배합된 상태에서의 각각의 역할, 사양 및 Type별 사용재료는 표 5.에 나타낸 바와 같다.

표 5. 배합된 상태에서의 각각의 역할 및 Type별 사용재료

사용재료 배합형태	제지슬러지 소각회	물	멜라민 수지	시멘트	경화제	잔골재	비 고
Type 1	◎	◎	×	◎	×	◎	상온제조
Type 2		×	◎	×	◎		
Type 3		◎	◎	◎	◎		
사 양	H사	수돗물	특성표참조	1종	-	5mm이하	-
역 할	충전제	결합재			결합보조제	씨앗골재	-

2) 결합재의 선정

소각회는 미세한 분말형태의 입자로 수경성을 갖지 않는다. 따라서 이들 입자 상호간을 연결해주는 적절한 결합재의 선정이 매우 중요하다. 일반적으로 소각회의 강열감량은 비교적 높아서 목재성분을 가지는 미연소탄분이 존재하게 된다. 따라서 결합재의 선정시 목재의 성분과 적합한 특성을 지니는 멜라민 수지를 주 결합재로 선정하였다. 그리고 경제성을 확보하는 수단으로서 고온경화형이 아닌 상온경화특성도 멜라민 수지를 선정하는 요인이 되었다. 또한 결합재로서 경제성을 감안하여 시멘트와 유레아 수지의 혼합가능성도 시험하였다. 표 6.에 대표적인 멜라민 수지의 특성을 나타내었다.

표 6. 멜라민 수지의 특성

pH	외관	Non-Volatile (%)	Viscosity (CPS)	비중 (at 20℃)	Water Toiarance
8.0	무색투명 점조색	52.3	32	1.22	2배

2.3.2 배합수준결정

골재를 제조하기 위한 배합수준의 결정을 표 7.에 나타내었다. 배합수준의 결정은 상온에서의 원심력을 이용한 골재형성에 주안점을 두고 실시한 사전예비실험을 통해 결정하였다. 배합수준을 검토시 가능한한 경제적인 배합이 가능하도록 소각회의 함유율을 높이고 수지의 사용을 줄이는 배합이 되도록 배합수준을 결정하였다. 멜라민 수지의 특성상 시멘트와 물의 혼합이 가능하기 때문에 수지의 사용량을 최소화하는 배합이 Type II이며, 유레아 수지는 멜라민 수지보다 경제적이고 멜라민 수지의 특

성을 유지하면서 골재의 표면크랙을 저감시켜주기 때문에 사용을 적극 검토하였다. 향 후 골재의 용도 별 또는 강도별 제조방안이 확보되면 결합재로서 시멘트와 수지의 혼합사용이 가장 많이 활용되리라 판단된다.

표 7. 배합수준의 결정 (함유율은 시료전체중량에 대한 비율)

결합재의 종류별	멜라민수지의 함유율(중량)	W/B(%)	시멘트 혼합율(%)	잔골재 혼합율(%)	소각회 혼합율(%)
Type I (시멘트)	0 %	40~90	20~50	0~30%	30~50%
Type II (시멘트+멜라민)	0~30%	30~70%	0~25		
Type III (멜라민+유레아)	25~50%	0	0		

2.3.3 상온 경화 원심력식 골재생산공정의 개발

상온 골재제조공정에는 가경식 콘크리트 믹서를 활용하였다. 이것은 결합재량이 많은 부배합의 모르타르나 콘크리트의 배합시 원심력에 의해 회전하는 잔골재표면에 결합재가 균일하게 부착하여 구상의 골재가 만들어지는데에서 착안한 당 연구실의 독자적인 골재제조기술이다.

1) 제조공정의 확립

상온 경화 원심력식 골재생산공정은 총 6개의 공정을 거치게 되는데, 이러한 골재의 제조공정을 표 8에 나타냈다. 球狀의 골재를 제조하기 위한 핵심공정은 3단계인 형상조절단계인데 이 단계에서는 반복적인 작업을 통해 적정한 골재를 제조하게 된다.

표 8. 골재제조공정



2) 잔골재의 역할 정립

골재제조공정중 소각회를 골재표면에 골구로 부착시키는 씨앗의 역할을 하는 것은 5mm이하의 잔골재이다. 원심력에 의해 잔골재가 회전하면서 수지를 입힌 전체표면에 소각회를 부착시키게 되는 것이다. 이런 공정을 3~5회 반복하게 되면 소정의 크기를 지니는 인공골재를 제조할 수 있게 되는 것이다.

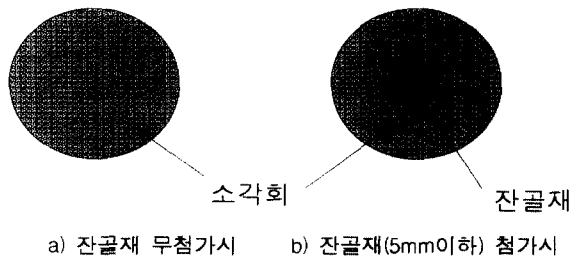


그림 1. 씨앗골재의 역할과 인공골재의 단면

골재를 완성한 후 씨앗골재의 역할을 확인하기 위해 제조된 골재의 단면을 관찰한 결과 그림 1과 같이 인공골재의 중앙에 씨앗골재가 자랍하고 있는 것이 확인되었다. 한편, 잔골재를 사용하지 않은 인공골재도 제조가능함을 확인하였다.

2.4 골재시험생산결과

2.4.1 결합재별 골재생산시험결과

소각회와 결합재로서 멜라민 수지, 시멘트 등의 사용을 검토한 골재생산시험결과를 표 9~표 11에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 각 결합재별로 골재 생성율은 71~88 %에 이르렀다. 나머지 분체도 회수하여 재사용이 가능한 점을 고려할 때 소각재 100%를 골재제조에 활용할 수 있다고 판단된다. 특히, 결합재로서 시멘트와 유레아 수지의 사용시에도 골재의 생산가능성이 확인되어 인공골재의 경제성을 확보할 수 있게 되었다. 향후 더욱 경제적인 배합의 확보를 위해 결합재의 사용량을 저감시킨 배합시험을 수행할 필요가 있다.

표 9. 골재생산시험결과 I(시멘트를 결합재로 사용한 경우)

배합 조건 결합재별	배합조건				생산결과	
	소각회:시멘트	배합시간	잔골재사용	재료투입순서	골재 생산량	골재 외관상태
Type 1	1:1	60초	×	II ^{*1}	83%	양호
			○	I ^{*2}	82%	양호
	1:0.5		○	I	71%	양호
			×	II	73%	양호

표 10. 골재생산시험결과 II(시멘트+멜라민 수지를 결합재로 사용한 경우)

배합 조건 결합재별	배합조건				생산결과	
	소각회:멜라민:시멘트	배합시간	잔골재사용	재료투입순서	골재 생산량	골재 외관상태
Type 1	1:1:1	60초	×	II ^{*1}	86%	양호
			○	I ^{*2}	85%	양호
	1:0.5:0.5		○	I	72%	양호
			×	II	74%	양호

표 11. 골재생산시험결과 III(멜라민+유레아 수지를 결합재로 사용한 경우)

배합 조건 결합재별	배합조건				생산결과	
	소각회:멜라민:유레아	배합시간	잔골재사용	재료투입순서	골재 생산량	골재 외관상태
Type 1	1:1:1	60초	×	II ^{*1}	88%	양호
			○	I ^{*2}	85%	양호
	1:1:0		○	I	75%	양호
			×	II	75%	양호

3. 결 론

본 연구는 제지 슬러지 소각회의 재활용 연구로서 인공골재를 제조하여 건설현장에 적용하기 위한 것이다. 지금까지의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

3.1 소각회의 분석결과

제지슬러지를 재활용하기 위해 기본적 특성을 분석한 결과 건설현장에서 재활용이 많이 이루어지고 있는 플라이 애쉬등과 유사한 성분과 특성을 지니고 있어 건설산업에서의 흡수활용이 가능하다. 특히, 용출특성에 있어서도 유해중금속의 함유량이 허용치이내여서 재활용에 큰 문제는 없을것으로 판단된다.

3.2 적정 결합재의 선정

제지 슬러지 소각회를 인공골재로 제조하기 위해서는 경제적이고 현장에서 손쉽게 이용할 수 있는 결합재의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 멜라민, 유레아 수지, 시멘트등이 검토되었고 검토된 재료들은 모두 결합재로서 충분한 골재 제조율을 보여 주었다.

3.3 골재제조공정의 개발

구상의 골재형상을 가지는 소각회골재를 생산하기 위해 원심력을 발생시키는 간편한 믹서를 이용한 공정개발이 이루어졌으며, 이 공정을 이용한 실험결과 소각회의 75~85%정도가 골재로 제조가 가능하며, 나머지 소각회도 재회수하여 사용이 가능하다.

3.4 향후 방안

개발된 골재의 품질시험이 이루어지고 있으며 적정 품질확보와 함께 콘크리트에의 적용가능성, 경제성 확보방안, 골재제조기계의 pilot plant 개발등이 계속적으로 연구될 전망이다. 또한 플라이 애쉬, 하수 슬러지 소각회 등을 이용한 상온골재제조방안도 연구되고 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 G-7환경공학기술개발과제로 선정되어 현재수행중인 연구과제이며, 본 논문에 관련된 골재제조공법 및 제조기계는 특허출원중입니다. 본 과제를 수행하는데 많은 도움을 주신 국립환경연구원 G-7 기획과 직원 및 연구위원, 전일제지, 현대 콘크리트 관계자들에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 백명중 외 3명, "제지 슬러지 소각회를 이용한 경량 탄소섬유보강 폴리머 시멘트 콘크리트에 관한 연구", 대한건축학회학술발표논문집, 제 13권 제 2호, '93.10, pp.603~606
2. 下水汚泥の 建設資材利用マニュアル(案), 下水汚泥資源利用協議會
3. 김상연, "폐수처리슬러지 소각회의 유효이용 및 중금속 용출거동에 관한 연구", 전북대학교 토목공학과 박사학위논문, 1995. 8월