

하수 슬러지를 이용한 비구조용 초경량골재의 개발

Development of Super Lightweight Aggregate for Non-Structural Concrete using Sewage Sludge

문 경 주* 위 영 미* 박 희 열* 이 무 성* 소 양 섭**
Mun, Kyoung Ju Wi, Yeong Mi Park, Hee Youl Lee, Mu Seong Soh, Yang Seob

Abstracts

The purpose of this study is to manufacture sintered lightweight aggregate for non-structural concrete using sewage sludge, organic waste matter is produced to a sewage treatment plant. It is tested for basic property and strength of artificial aggregate according to addition ratio of sewage sludge, and the results are compared with imported aggregate from Spain. As the results of experiment, the manufactured lightweight aggregate could be used for non-structural concrete. Also, it was favorably comparable to those of the imported aggregate. When it is manufactured with aggregate, it is safe environmentally because of protecting elution of harmful heavy metals.

1. 서론

하·폐수 처리장에서 발생하는 슬러지는 산업의 발달 및 인구의 증가와 특히 최근에는 수질환경 개선사업의 확대에 인하여 1997년 이후 매년 3% 이상의 증가를 보이고 있다. 발생된 슬러지는 합수율이 80% 이상이기 때문에 매립, 소각, 재활용 등에 있어서 커다란 어려움을 겪고 있으며, 특히 2003년 6월 이후 직매립이 전면 금지될 예정이고, 런던협약에 의해 장기적으로는 해양투기도 금지될 상황에 놓여있어 이의 효율적인 처리방안 마련이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구는 하수 슬러지의 효과적인 처리와 동시에 고부가성 초경량골재로 제조 가능성을 평가하기 위한 것으로, 하수 슬러지의 발열에 의한 내부에서 가스가 발생되어 순간적으로 용융·발포를 일으키기 때문에 기존 소성 경량골재에 비해 비중과 소성에너지를 현저하게 낮출 수 있다. 따라서 제조된 인공골재의 기본적인 물성 및 품질정도를 파악하여 건설재료로서의 재활용 가능성에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 사용재료

본 실험의 주재료로 사용된 하수 슬러지는 C시의 하수종말처리장에서 채취하였으며, 점토는 Y군의 인근

* 정희원, (주)네오이엔비 건설환경기술연구소

** 정희원, 전북대학교 건축·도시공학부 교수, 공업기술연구센터

토양에서 채취한 것으로, 자연건조한 후 배합물의 균질한 혼합을 위하여 50mesh로 이하로 파쇄 및 분쇄하여 사용하였다.

2.2. 시험방법

2.2.1 점토 및 하수슬러지의 분석

점토 및 하수슬러지에 존재하는 각각의 원소에 대한 정량적인 분석은 형광X선 분석기(XRF)로 분석하였으며, 하수슬러지의 수분함량, 발열량 및 유기물 함량 시험 등을 실시하였다. 또한 하수슬러지의 광물학적 분석을 위해 100±5℃의 건조기(Dry oven)에서 24시간 건조된 시료에 대해 X-선 회절분석과 100℃~120 0℃, 10℃/min로 열분석(TG-DTA)을 수행하였다. 또한 하수슬러지 내에 중금속 함량 시험은 EPA 3050A (Acid Digestion Method32)에 준하여 모든 성분을 용해한 후 ICP를 이용하여 분석하였다.

2.2.2 골재의 배합 및 성형

인공경량골재 제조방법은 점토 100중량%에 대하여 하수슬러지(탈수케익상태 중량 기준) 100~500중량%로 Table 1과 같이 배합하였으며 이때의 혼합방식은 케이크 상태의 습식 재료와 건조된 분체형 재료와의 균질한 페이스트 제조를 위해

Table 1. Mixing ratio of artificial aggregate

Type	Clay (wt%)	Sewage sludge(wt%)
A	100	100
B		200
C		300
D		400
E		500

쟁기식 믹서기로 1차 혼합한 후 순환형 롤러 압축혼합기에 투입 후 2차혼합을 실시하였다. 이 페이스트를 직경 2~6mm 직경으로 압출시키고, 직경과 동일한 직경크기로 절단하여 회전 드럼에서 굴러 완전 구형으로 성형한 다음, 성형체를 건조시키고, 건조된 성형체를 온도 900~1,050℃의 조건에서 투입하고, 소성온도 1,050~1,250℃의 온도에서 10~25분간 소성하였다. 하수슬러지는 첨가량이 적을 시는 수분함량 80~90중량%인 탈수케이크 상태의 그대로 사용할 수도 있고 첨가량이 많을 경우에는 수분함량 30~60중량%로 건조하여 사용하거나 완전 건조 후 분쇄하여 수분함량 80~90중량%인 탈수케이크 상태와 혼합하여 전체 수분함량 20~40중량%로 하여 사용할 수도 있다. 이는 골재의 성형 시 수분을 일체 첨가하지 않기 위함인데 이에 따라 하수슬러지의 혼입량을 많게 함으로써 발포를 극대화시킬 수 있고 하수슬러지의 건조비용을 최소화하여 경제성을 확보하고자 했다.

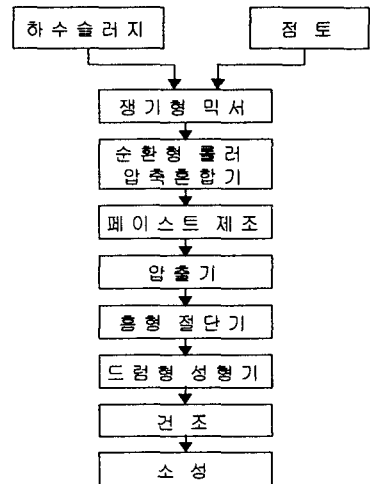


Fig. 1 Manufacturing process of artificial aggregate

2.2.3 골재의 물성평가

본 연구에서 제조된 인공경량골재의 물성평가는 비중, 흡수율, 마모율, 파쇄율 및 충격율 등을 KS 기준을 근거로 실시하였으며, 현재 국내에 수입되고 있는 S산의 인공경량골재와 비교·평가하였다.

2.2.4 골재의 미세구조

제조된 인공경량골재의 미세구조를 관찰하기 위하여 전자 현미경(SEM)을 이용하여 분석하였다.

2.2.5 환경위해성 평가

제조된 골재의 중금속 용출특성을 알아보기 위하여 한국의 폐기물공정시험법과 미국의 EPA법에 따라 용출시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 점토 및 하수슬러지의 화학적 분석결과

일반적으로 인공경량골재의 발포원리는 원료가 고온에서 일부 용융되어 적절한 점성을 갖게 됨과 동시에 원료 내부에서 가스가 발생되고 내부의 가스압이 원료의 점성보다 약간 클 때 발포팽창이 일어나게 된다. 따라서, 고온에서 일어나는 골재의 팽창은 원료의 점성에 좌우되며 원료의 점성을 결정하는 인자는 화학조성이다. Table 2에서 알 수 있듯이 하수슬러지는 일반점토의 성분과 유사하며 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로 약 73%를 차지하는 것으로 나타났으며 고온에서 급격한 점성변화를 유발시키는 성분인 CaO, MgO 성분이 10 %이하로 함유되어 있기 때문에 고온에서 급격하게 용융될 가능성은 없을 것으로 판단되었다. 일반적으로 Al₂O₃/SiO₂의 비가 크면 소지의 용융온도가 높고 점성이 크지만 하수슬러지는 Al₂O₃/SiO₂의 비가 크지 않아 소지의 용융점이 낮을 것으로 기대된다. 또한 하수슬러지의 발열량은 3,000cal/g 이상으로서, 이로 인한 소성에너지의 절감은 물론 발열에 의한 골재 내부용융이 촉진되리라 판단되었다.

Fig. 2는 하수슬러지의 X-선 회절 분석 결과이다. Fig. 2에서와 같이 현저한 석영 피크를 볼 수 있으며 그 외 장석이나 백운모 및 녹니석 등의 피크를 볼 수 있다. Fig. 3에는 하수슬러지의 열분석(TG-DTA) 결과를 나타내었다. 그림 3에서와 같이 하수슬러지는 약 290℃와 388℃ 영역에서, 발열과 함께 유기물의 열분해가 있음을 알 수 있으며 약 700℃ 부근에서 열적평형에 도달함을 알 수 있었다.

Table 2 Physical and chemical properties of sewage sludge and clay

material	water content (%)	organic contents (%)	inorganic contents (%)	higher calorific value (cal/g)	Major elements(%)									
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
sewage sludge	83.08	10.17	6.75	3,314	52.00	20.94	0.94	8.98	2.21	4.06	1.30	3.11	0.12	5.31
clay	-	7.13	92.87	-	66.73	19.28	0.98	6.63	1.63	0.43	0.95	3.13	0.13	0.11

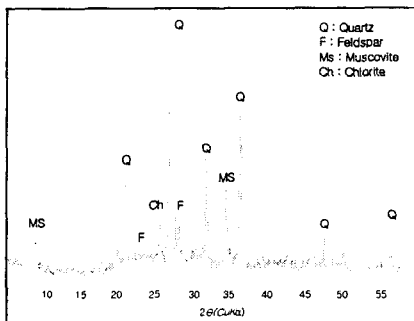


Fig. 2 XRD analysis of sewage sludge

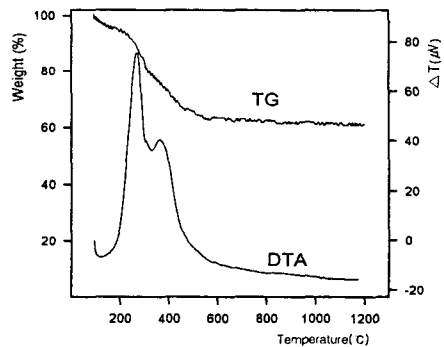


Fig. 3 Thermal analysis of sewage sludge

Table 3 Microelement concentration of sewage sludge (Unit : ppm)

Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
1204.33	83.61	1094.02	15.68	88.62	710.53	1648.02	71.21	113.46	5.92	126.82

3. 2 시제품의 물성평가

3.2.1 비 중

비중은 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 감소하였는데 이는 유기성 물질의 발열 및 연소에 의한 완전한 내부소결성의 증가와 함께 가스발생에 의한 발포가 활발하였기 때문에 사료된다. 점토대비 하수슬러지(탈수케익상태 중량 기준) 300%이상을 혼입한 C에서 스페인산의 골재와 유사한 초경량 골재의 제조가 가능하였다.

3.2.2 흡수율

흡수율은 비중과 오히려 반대적 성상을 나타내었는데 일반적으로 비중이 증가할수록 흡수율은 감소하는 특성을 보이나 본 실험결과에서는 하수슬러지의 발열에 의한 내부 용융이 더욱 잘 이루어짐으로써 비중이 낮아질수록 반대로 흡수율이 낮아지는 특성을 보였다.

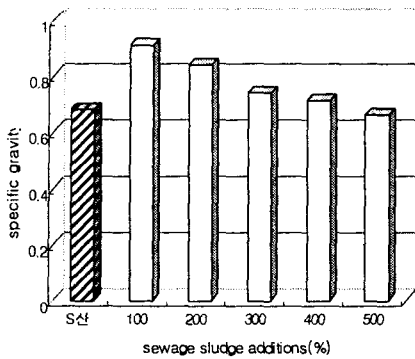


Fig. 4 Specific gravity according to addition ratio of sewage sludge

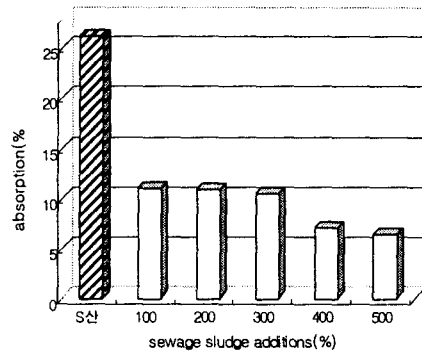


Fig. 5 Absorption ratio according to addition ratio of sewage sludge

3.2.3 강도적 특성

(1) 마모율

본 실험에서는 스페인산 경량골재와 본 실험에 의한 각 배합비에 따른 마모율을 비교하기 위한 것으로 KS규준에 의거하여 Table 4와 같은 조건으로 설정하여 실험을 실시하였으며 그 결과가 Table 5이다. Table 4와 같은 조건에서 경량골재의 마모에 의한 손실 백분율은 18.2~20.2%로서 점토대비 하수슬러지가 300%이하 혼입된 A, B에서는 모두 스페인산 보다 우수한 내마모특성을 나타내었으며, 300%이상 혼입된 C, D, E에서는 스페인산에 비하여 마모율이 약간 높게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다.

Table 4 Test condition of abrasion resistance

Diameter of aggregate (mm)	Weight of sample(g)	Number of steel ball	Number of rotation	Passing sieve (mm)
4~6mm	2500	4	500	1.18

Table 5 Test result of abrasion resistance

	S	Sewage sludge addition(%)				
		A(100)	B(200)	C(300)	D(400)	E(500)
abrasion(%)	19.6	18.2	18.2	18.5	19.8	20.2

(2) 파쇄율

본 시험에 사용된 골재가 초경량골재이기 때문에 KS규준에 의거하여 Table 6과 같은 조건으로 설정하여 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 스페인산의 시험결과는 35.1%로 나타났고 본 실험 배합비에 따른 파쇄손실 백분율은 31.3~36.1%이고 전반적으로 점토대비 하수슬러지의 혼입량이 증가할

수록 파쇄강도 특성이 점차 약해지는 특성을 보였다.

(3) 충격율

충격을 시험은 충격에 대한 골재의 저항성을 나타내는 한 방법으로, 골재의 탄탄한 정도를 판정한다. 충격 시험법은 용기 속에 채워 놓은 골재에 추를 낙하시켜 충격을 줌으로써 파쇄손실 백분율을 측정하는 방법이다. 본 시험에서는 Table 8과 같은 조건으로 설정하여 실험을 실시하였다.

Table 6 Test condition of crushing resistance

Diameter of aggregate (mm)	Diameter of cylinder (mm)	Load (ton)	pressure time (min)	Passing sieve (mm)
4~6	75	3	3	0.6

Table 7 Test result of crushing resistance

	S	Sewage sludge addition(%)				
		A(100)	B(200)	C(300)	D(400)	E(500)
crushing(%)	35.1	31.3	32.5	35.5	35.8	36.1

Table 8 Test condition of impact-crushing resistance

Diameter of aggregate (mm)	Weight of hammer (kg)	Number of impacting	Passing sieve (mm)
4~6mm	14	15	1.18

Table 9 Test result of impact-crushing resistance

	S	Sewage sludge addition(%)				
		A(100)	B(200)	C(300)	D(400)	E(500)
Impact crushing(%)	33	29.9	31.3	32.1	33.3	33.9

동적 압축하중에 대한 골재의 저항성은 전반적으로 정적 압축하중에 대한 저항성 및 마모율과 비슷한 경향을 보이고 있다. 전반적으로 본 실험에서 제조한 경량골재는 스페인산 골재보다 동등 이상의 우수한 충격 저항성을 나타내었다.

3. 3 골재의 미세구조

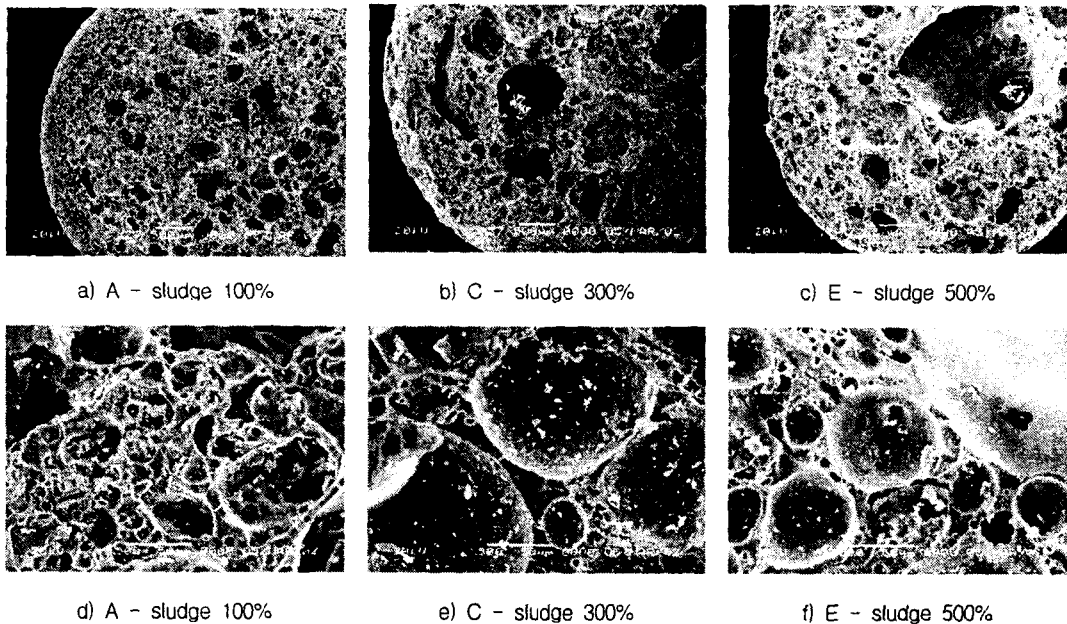


Fig. 6 Inner micro-structure of sintered aggregate

골재의 표면에 있는 얇은 층은 골재의 발포시에 용착을 방지하는 역할을 하는데, 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 표면의 층이 얇아져 하수슬러지 500%를 혼입한 E의 경우 대량 생산 시 내화도가 높은 코팅 등이 필요할 것으로 생각되었다. 내부구조는 하수슬러지 100%를 혼입한 A의 내부의 모든 기공 직경은 500 μ m이하로 나타났으나 300%이상 혼입된 C 및 E의 경우에는 500~1,500 μ m의 큰 기공이 불규칙 적으로 분포하고 있다. 큰 기공의 생성은 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 유기물의 분해에 의한 가스발생이 과다하게 이루어졌기 때문이다. 그러나 하수슬러지의 혼입율이 증가할수록 유기물의 내부발열에 의한 온도가 높게되어 내부에서 과량의 액상성분 발생에 의한 유리화가 잘 이루어져 공극에 의한 강도저하를 방지하는 효과가 있고 오히려 흡수율이 낮아지는 효과가 있었다.

3.4 골재의 용출시험

하수슬러지의 혼입량이 100%로 가장 낮은 A골재와 500%로 가장 높은 골재인 E골재를 선택하여 용출시험을 실시한 결과 대부분의 중금속은 불검출되었다. Mn, Ni, 그리고 Zn이 소량 용출되었으나 환경에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단된다.

Table 10 Results of elution tests with artificial aggregate

(unit:ppm)

Method of analysis	Type	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
EPA	A(100%)	ND	ND	0.36	ND	4.53	ND	0.49	ND	0.70	ND	ND
	E(500%)	ND	ND	0.35	ND	5.28	ND	0.50	ND	ND	ND	ND
KSLT	A(100%)	ND	ND	0.28	ND	1.06	ND	0.28	ND	ND	ND	ND
	E(500%)	ND	ND	0.31	ND	1.07	ND	0.34	ND	ND	ND	ND

4. 결 론

- 1) 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 유기성 물질의 발열 및 연소에 의한 완전한 내부소결성이 증가와 함께 가스발생에 의한 발포가 활발하여 비중이 감소되었고, 하수슬러지 300%이상을 혼입한 경우 수입산 골재와 비중이 유사한 초경량 골재의 제조가 가능하였다.
- 2) 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 하수슬러지의 발열에 의한 내부 용융이 더욱 잘 이루어짐으로써 흡수율이 낮아지는 특성을 보였으며 전반적으로 수입산에 비하여 월등하게 우수한 흡수특성을 나타내었다.
- 3) 본 실험을 통해 제조된 골재의 강도 특성은 하수슬러지의 혼입량이 증가할수록 약간씩 감소하는 특성을 보였으나 그 차이는 크지 않았으며, 전반적으로 수입산 골재보다 동등 이상의 우수한 강도 특성을 나타내었다.
- 4) 제조된 골재의 용출시험 결과 유해 중금속은 거의 불검출 되었고 일부 미량의 중금속이 용출되었으나 환경에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 차세대 핵심환경기술개발사업(연구과제명 : 유·무기성 폐기물을 이용한 초경량 발포체 상용화 기술 및 제조장치 개발)의 일환으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

- 1) 소양섭 외 2인, “제지 슬러지 소각재를 이용한 소성 경량골재의 제조”, 한국콘크리트학회논문집, 제13권 2호, 2001. 4, pp. 114~119.
- 2) 나춘기 외 4인, “하수슬러지를 내부열원으로 활용한 도시소각재의 소결특성”. 한국폐기물학회학술발표논문집, 2001, 11, pp.226