

도시 쓰레기 소각 비산재와 산업부산물을 이용한 비소성 인공골재의 제조

Manufacture of the Non-Sintered Aggregate Using the Industrial By-products and the Municipal Waste Incineration Fly-Ash

김대규* 윤성진** 문경주*** 소양섭****
Dae-Kyu Kim Seong-Jin Yoon Kyoung-Ju Mun Yang-Seob Soh

ABSTRACT

Incineration method of municipal solid waste is the general method for reduction its quantity and weight. Municipal solid waste incineration ash is classified two general types of ash ; fly ash((MWFA) and bottom ash(MWBA)). MWFA containing a high degree heavy-metal may give rise to a serious environmental trouble. Therefore, this study was carried out to examine utilization of fly ash. In this study, we tried to find the recycling method of fly ash as a environmental-friendly artificial aggregate. The artificial aggregate using fly ash was tested for the various aspects, including physical properties and environmental stability. The qualities of artificial aggregate are similar to it of lightweight aggregate, and the heavy metal leaching concentration are very lower than a limitation of KSLT and EP.

1. 서론

소각 잔재물로 바닥재(Bottom Ash)와 비산재(Fly Ash)가 배출되며, 이중 소각 잔재물의 대부분을 차지하는 바닥재는 중금속 농도가 비교적 낮기 때문에 일반폐기물로서 관리되고 있는 반면, 비산재의 경우 소각장에서 수은, 납, 카드뮴 등의 유해 중금속 함유량이 지정 폐기물 판정 기준치를 초과하여 '97년 9월 이후 지정폐기물로서 관리되고 있다. 지정폐기물로 지정되기 이전에는 바닥재와 비산재를 분리하지 않고 병커에 모았다가 매립지에 일반폐기물과 함께 매립해왔으나 현재 새로이 건설중이거나 계획중인 소각장 시설에는 비산재 처리 시설이 별도로 설계에 반영되고 있으며, 최종적으로 고형화 시켜 매립 처리하고 있다. 그러나 국내 지정폐기물 처리시설로 큰 역할을 담당하고 있는 환경관리공단 화성사업소가 1997년을 마지막으로 폐기물 매립한계에 도달하여 수도권 지정폐기물은 전량 온산사업소로 이송이 불가피한 현실과, 또한 온산사업소에서도 폐기물을 무한정 수용할 능력이 없는 점을 감안할 때 지정폐기물을 고형화/안정화 처리한 후 일반폐기물로 취급하거나 재활용 할 수 있는 기술의 개

* 정회원, 전북대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 전북대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 전북대학교 대학원 박사수료, 전북대학교 강사

**** 정회원, 전북대학교 건축·도시공학부 교수, 공학박사, 공업기술연구센터

발이 더욱 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 중금속 함유량이 많은 도시 쓰레기 소각 비산재(Municipal Waste Incineration Fly-Ash, 이하 MWFA라 함)를 친환경적으로 재활용하기 위한 방안으로 저가의 산업부산물을 무기계 바인더로 이용하여 인공골재를 제조한 후, 제조된 인공골재의 물리적 품질특성 및 중금속 용출 실험을 실시하여 건자재로서의 활용을 위한 기초적 자료를 제시하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1. 사용재료

2.1.1 비산재

비소성 인공골재(Non-Sintering Artificial Aggregate, 이하 NSA라 함)의 제조를 위한 도시 쓰레기 소각 비산재는 I시 소각장에서 발생되는 것을 사용하였으며 그 화학적 조성은 표 1과 같다.

2.1.2 시멘트 및 산업부산물

시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 국내 D사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 시멘트의 절감을 통한 경제성 확보를 위해 결합재로 국내 K제철에서 부생하는 고로슬래그(Blast-Furnace Slag, 이하 BFS라 함), 무연탄계 서천산 비정제 플라이애쉬(Pulverised Fly-Ash, 이하 FA라 함)와 N사에서 배출되는 폐인산석고(Phosphogypsum, 이하 PG라 함) 등의 산업부산물을 사용하였으며 각각의 화학적 조성은 표 1과 같으며 MWFA의 중금속 함유량은 표2와 같다.

표 1 사용재료의 화학적 조성

(unit : wt%)

Type \ Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Ig. Loss
MWFA	5.74	2.61	0.53	0.30	2.00	35.49	3.79	3.28	0.06	1.22	-	14.32	15.44
BFS	4.51	17.04	-	0.30	6.87	42.65	-	-	-	-	0.06	-	0.29
FA	55.66	27.76	-	7.04	1.14	2.70	0.35	0.59	-	-	0.49	-	4.72
PG	1.98	0.7	-	0.11	-	31.66	-	-	-	-	43.95	-	20.32

표 2 MWFA의 중금속 함유량

(unit : ppm)

Composition	Cr	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
MWFA	50.74	411.78	4237.40	135.72	15.50	1462.35

2.2. 실험방법

2.2.1 배합 및 실험방법

표 3은 골재를 제조하기 위한 배합으로서 MWFA와 시멘트의 혼입량을 중량비 1:1을 기준으로 시멘트의 혼입량을 최대한 감소시키고자 BFS, PG를 시멘트의 중량비에 일정비율로 혼합하였으며, 다시 BFS의 일정량을 FA로 치환하였다. 또한 골재의 표면에 잔존할 수 있는 중금속의 확실한 밀봉효과를 기대하기 위해 시멘트 코팅을 하였는데 이것이 NSA의 품질에 어떠한 영향을 미치는지 평가하였다.

제조된 골재의 전자재로서의 활용가능성을 검토하기 위하여 기본적인 물성인 비중, 흡수율, 단위용적중량 및 실적률 시험을 실시하였으며, 골재의 강도를 평가하기 위해 정적 압축하중에 대한 저항성과 충격에 대한 저항성을 평가하였다. 이들의 모든 품질시험은 KS 및 BS 규정에 의거하여 실시하였다.

표 3 비소성 인공골재 제조를 위한 배합비

Type	MWFA (wt%)	Binder				Coating
		OPC (wt%)	BFS (wt%)	PG (wt%)	FA (w/t%)	
NSA 1	50	50	-	-	-	×
NSA 2		2.5	22.5	10	15	×
NSA 3		2.5	22.5	10	15	○
NSA 4		5	35	10	-	×
NSA 5		5	35	10	-	○

2.2.2 비소성 인공골재(NSA)의 제조

NSA의 성형방법에는 가경식 드럼방식, 압출사출방식, 압축 롤러방식, 디스크 성형방식등 여러 가지가 있으나, 본 실험에서는 성형조건의 조절이 용이하며 대량생산이 가능한 디스크 성형 방식을 사용하였다. 디스크 성형 방식은 회전하는 디스크에 분체형의 원료를 공급하면서 수분을 동시에 분무하여 성형하는 방식으로 본 실험에 사용한 장비의 사양은 표 4와 같다.

그림 1은 NSA를 제조하기 위한 제조 공정도로 일련의 공정을 거쳐 제조된 NSA를 24시간 습윤양생(60℃, RH 80%)을 실시한 후, 다시 수증에서 27일 양생하였다.

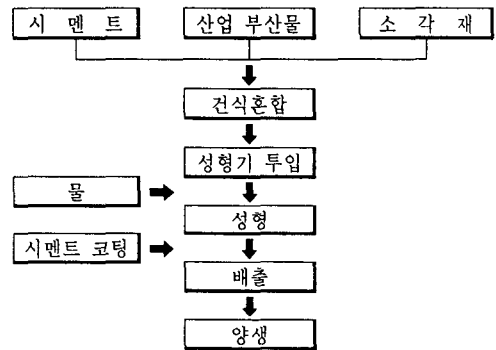


그림 1 인공골재의 제조공정

표 4 Disk Type 성형기의 사양

Disk Diameter(cm)	Damper Height(cm)	RPM	Slop(°)	Liquid(kg/min)	Feed(kg/min)	Production (kg/hr)
80	10~15	5~40	35~55	0~2	0~5	100~200

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 인공골재의 품질특성

3.1.1 비중 및 흡수율

골재를 5~9mm로 입도 분급하여 비중 및 흡수율을 측정한 결과, MWFA와 시멘트만을 사용한 경우 비중이 약 1.72정도로 나타났으며, 산업부산물을 이용한 경우 1.53~1.68로 약간 비중이 낮게 나타났다. 이는 산업부산물을 결합재로 혼입한 경우 이들의 비중이 시멘트보다 적기 때문으로 사료되었다. 전반적으로 제조된 인공골재(NSA)는 일반적인 인공경량골재의 비중(절건비중 1.5이하)을 약간 상회하는 것으로 나타났다.

또한 흡수율의 경우 약 13~18%로 미국의 ASTM 및 일본의 JIS의 규정인 경량골재의 흡수율(10~30%)을 만족하는 것으로 나타났다. 산업부산물을 혼입한 경우 다소 높은 흡수율을 보여주었으며 표면 코팅에 의해 흡수율이 대폭 저감할 것으로 기대되었으나, 큰 차이를 보이지는 않았다.

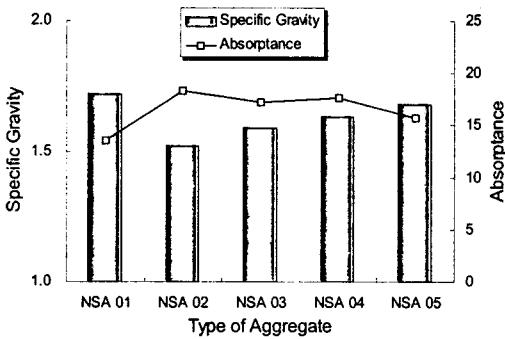


그림 2 골재의 종류에 따른 비중 및 흡수율

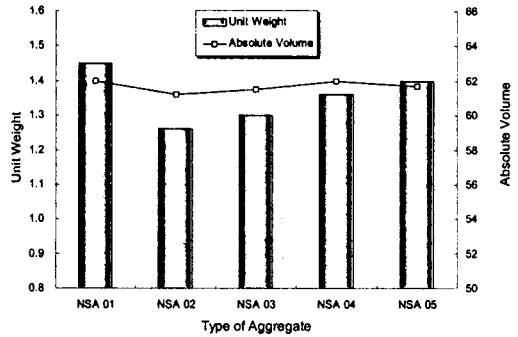


그림 3 골재의 종류에 따른 단위용적중량과 실적률

3.1.2 단위용적중량 및 실적률

골재의 단위용적중량과 실적률은 최대치수, 입도분포, 입형 등에 따라 변화하게 되는데, 본 실험에는 5~9mm로 입도 분급하여 측정된 결과 단위용적중량은 결합재로 시멘트만을 사용한 경우 다른 타입의 골재보다 약간 증가하였으며 전반적으로 비중과 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 실적률은 전반적으로 60%를 상회하는 것으로 나타났는데 이는 제조된 NSA의 입형이 구형이며 크고 작은 입자가 골고루 섞여 있기 때에 충전효과가 좋기 때문으로 사료되었다.

3.1.3 파쇄율 시험

골재의 강도를 직접 측정하는 것은 극히 어려우므로 KS F 2541에 의한 파쇄시험에 의해 골재강도를 추정하고 있다. 본 실험의 파쇄시험 결과 산업부산물인 BFS와 PG를 혼입한 경우 시멘트만을 결합재로 사용한 경우보다 우수한 강도특성을 나타내었는데 이는 PG와 BFS의 수화반응을 통해 에트링가이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, ettringite)를 생성시키고 슬래그 중의 남은 성분은 서서히 CSH와 AH_3 계의 겔상의 수화물을 형성함으로써 강도를 발현하기⁸⁾ 때문으로 사료되었다. 또한 BFS의 일정량을 FA로 치환함에 따라 NSA의 파쇄강도는 약간씩 저하하는 특성을 보였는데 이는 FA가 강도발현을 위한 수화물을 충분히 형성하지 못한 상태로 존재하여 단지 충전역할만 하기 때문으로 사료되었다. 그러나 시멘트만을 사용한 경우와는 파쇄강도 특성이 거의 동등하게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 시멘트 코팅을 실시한 경우 코팅하지 않은 NSA보다 약 10~15%정도 우수한 강도특성을 나타내었다.

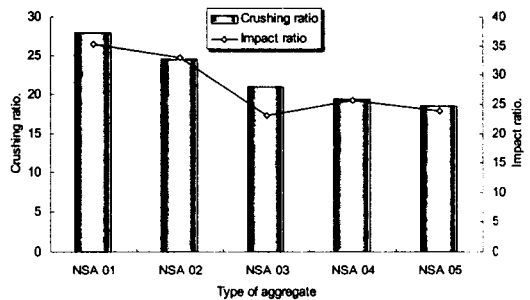


그림 4 골재의 종류에 따른 파쇄율과 충격률

3.1.4 충격률 시험

충격률 시험은 충격에 대한 골재의 저항성을 나타내는 한 방법으로, 골재의 견고한 정도를 판정한

다. 동적 압축하중에 대한 골재의 저항성은 전반적으로 정적 압축하중에 대한 저항성, 즉 파쇄율과 비슷한 경향을 보이고 있으며, MWFA와 시멘트만을 사용한 경우 충격파쇄율이 약 35%로서 가장 약했고, 산업부산물의 혼입한 경우와 표면 코팅한 경우가 약 26~33%로 우수하게 나타났으며 이에 시멘트로 표면 코팅한 경우 더욱 우수한 충격에 의한 강도 저항 특성을 나타냈다.

3.2 인공골재의 환경안정성 시험

MWFA의 환경유해성 정도와 제조된 골재의 환경 안정성 평가를 위한 중금속 용출시험은 한국의 용출시험 방법(KSLT)와 미국의 용출시험 방법(EP)을 기준으로 하여 MWFA는 시료를 채취한 후 바로 측정하였고, 제조된 5종류의 골재는 28일간 양생한 후 측정하였다. 이때 각 용출액의 중금속 이온 농도를 측정하여 표 6에 나타내었다.

표 5 중금속 용출실험 결과

Type	KSLT(ppm)					EP(ppm)				
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
용출기준	1.5	3.0	-	0.3	3.0	5.0	5.0	-	1.0	5.0
MWFA	0.888	2.731	11.239	0.380	25.108	1.735	4.539	0.742	0.411	14.062
NSA 01	0.053	0.269	0.205	N.D	2.020	N.D	0.064	0.053	N.D	0.652
NSA 02	N.D	0.052	0.027	N.D	0.096	N.D	0.057	0.072	N.D	0.217
NSA 03	N.D	0.055	0.021	N.D	0.131	N.D	0.065	0.086	N.D	0.085
NSA 04	0.221	0.425	0.227	N.D	1.310	N.D	0.067	0.041	N.D	0.378
LSA 05	N.D	0.019	0.069	N.D	0.257	N.D	0.082	0.007	N.D	0.119

표 6에 나타낸 것과 같이 MWFA는 Pb 및 Cd의 경우 기준치보다 약간 초과하는 것으로 나타났으나 각 배합비에 따라 제조된 NSA는 모든 중금속에 대해서 허용치 미만의 농도로 용출되어 골재의 환경 안정성을 확인할 수 있었다. 전체적으로 MWFA와 시멘트만을 사용한 경우 용출량이 가장 높게 나타났으며 FA를 첨가한 경우가 가장 낮게 나타났다. 이는 본 실험에서 사용된 FA가 무연탄을 사용한 비정제 FA로 다량의 미연소 탄소를 함유하고 있어 이의 표면이 매우 불안정하여 화학적으로 여러 작용기들이 결합하기 쉬우며, 물리적으로도 탄소구조 중에 다량 존재하는 다양한 크기의 미세기공으로부터 모세관 압력이나 분자간 인력에 의해 피흡착질이 흡착되기 쉽게 되어⁴⁾ 중금속이 FA의 탄소성분에 흡착된 것으로 사료되었다. 또한 PG와 BFS의 수화반응에 의해 치밀한 수화조직을 형성하여 수용성 중금속은 수산화물로 불용화시키고 수화반응중 생성된 에트링가이트에 의해 중금속 고정이 고정된 것으로 생각되었다. 이와 같은 사실로부터 산업부산물과 FA를 적절하게 혼입하여 NSA를 제조할 경우 중금속의 고정화 및 흡착에 있어서 더욱 효과적이라 판단되었으며, 또한 표면코팅을 실시할 경우 더욱 환경적으로 안정한 NSA를 제조할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3 X-선 회절분석

그림 5는 각각의 배합에 따른 X-선 회절분석 결과이다. 산업부산물을 사용한 경우 Ca(OH)₂의 피크는 감소하고 CSH 젤 및 에트링가이트의 수화물 피크는 증가하였다. 이는 FA가 Ca(OH)₂와

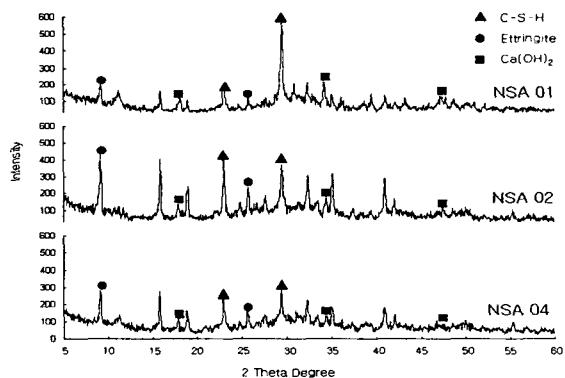


그림 5 NSA의 XRD 분석결과

반응하여 CSH겔의 생성으로 인해 Ca(OH)_2 를 일부 소모하기 때문이며, PG와 BFS의 수화반응에서는 Ca(OH)_2 를 거의 생성하지 않기 때문이다.⁷⁾

4. 결론

본 연구는 비산재에 산업부산물을 혼입한 NSA를 제조하여 건자재로서의 활용가능성을 검토한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 골재의 비중 및 흡수율은 각각 약 1.5~1.7과 13~18%의 값을 보였으며 단위용적중량과 실적률 또한 각각 1.2~1.5t/m³과 60~63%의 범위를 분포하고 있고 전반적으로 인공경량골재의 품질특성과 유사한 것으로 나타났다.
- 2) 골재의 강도적 특성을 살펴보기 위해 파쇄율과 충격률 시험을 실시한 결과 산업부산물인 BFS와 PG 등을 무기계 결합재로 이용한 인공골재의 경우가 시멘트만을 결합재로 사용한 경우보다 우수하게 나타났으며 표면코팅에 의한 경우 이보다 10~15%정도 더 우수한 면을 보였다.
- 3) MWFA를 이용하여 NSA 제조시 산업부산물과 FA를 혼입할 경우 치밀한 조직의 형성 및 중금속 흡착능력의 향상 효과가 있고 시멘트로 표면코팅을 실시할 경우 표면에 잔존 가능성이 있는 중금속을 다시 한번 밀봉시킬 수 있으므로 환경적으로 매우 안전한 NSA를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 건설기술개발연구사업(R&D/2001-C02)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최갑석, “국내의 소각재 처리 기술동향”, 환경기술정보지, 2002, vol.12, pp.10~14.
2. 정헌준외 3인, “석탄회 폐기물을 활용한 비소성 경량골재의 제조”, 환경관리학회지, 1999, vol.5, No.2, pp.339~345.
3. 유정근외 4인, “석탄회의 중금속 흡착제어 특성에 관한 연구”, 대한환경공학회지, 1997, vol.19, No.5, pp.651~660.
4. 石川 寛節외 6인, “石炭灰の資源化に関する研究(その1)石炭灰を用いた人工骨材の開発”, 日本建築学会大会 学術講演梗概集(東北), 2000, pp.603~604.
5. 문경주의 3인, “시멘트와 제지 슬러지 소각회를 이용한 인공골재 개발에 관한 연구”, 대학건축학회 학술발표논문집, 1998, vol.18, No.1, pp.909~914.
6. 소양섭외 2인, “제지슬러지 소각회를 이용한 비소성 인공골재의 제조 및 적용”, 대학건축학회논문집 구조계 16권 8호, 2000, pp.59~66.
7. “소각재를 이용한 다공성 보도블록 제조기술 개발”, 건교부 1차년도 결과보고서, 전북대학교, 2002.