

도시 쓰레기 소각 비산재를 활용한 인공골재의 인터로킹 블록 적용

The Applications of the Artificial Aggregate using the Municipal Waste Incineration Fly-Ash to Interlocking Block

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

ABSTRACT

The incinerated municipal waste can be classified into two general types of ash ; fly ash and bottom ash. The fly ash is appointed as specified waste, because it contains harmful heavy metals, ie Pb , Cd, etc. more than permitted standard index.

The purpose of this study is to manufacture the non-sintering artificial aggregates using municipal waste incineration fly-ash and to evaluate their applications as coarse aggregates in concrete interlocking block. The test results of water absorpsion, strengths of the concrete block using artificial aggregates showed that the artificial aggregates could be used in part of 10~20% as coarse aggregate in concrete block.

1. 서 론

도시 쓰레기 소각재(Municipal Solid Waste Incineration Ash)는 생활폐기물 소각장에서 배출되는 소각재로 배출부위에 따라 소각로 바닥으로부터 배출되는 바닥재(Bottom Ash)와 연소가스 속에 함유된 분진이 포집 제거되는 비산재(Fly Ash)로 구분된다. 현행 폐기물 관리법상 바닥재는 대부분 재로 구성되어 있으며, 국내 용출 실험방법(KSLT)에 따른 중금속 용출량이 용출규제 기준치를 대부분 초과하지 않아 일반폐기물로서 관리되고 있는 반면 비산재의 경우 중금속 등 유해물질을 다량 함유하고 있어 지정폐기물로서 관리되고 있다.³⁾ 이전에는 바닥재와 비산재의 분리도 시행하지 못하고 두가지를 병컩에 모았다가 매립지에 일반폐기물과 함께 매립해왔으나 현재 새로이 건설중이거나 계획중인 소각

* 정회원, 전북대학교 대학원, 석사과정

** 정회원, 전북대학교 대학원, 박사과정

*** 정회원, 전북대학교 대학원, 박사수료, 전북대학교 강사

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

장 시설에는 비산재 처리 시설이 별도로 설계에 반영되어 있으며, 최종적으로 고형화되어 매립 처리되고 있다. 그러나 국내 지정폐기물 처리시설로 큰 역할을 담당하고 있는 환경관리공단 화성사업소가 1997년을 마지막으로 폐기물 매립한계에 도달하여 수도권 지정폐기물의 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 개발이 더욱 절실한 실정이다.

이에 본 연구는 도시쓰레기 소각장에서 발생하는 비산재를 저가의 무기계 결합재로 고형화 하여 비소성 인공골재를 제조한 후 인터로킹 블록에 적용하여 그 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 인공골재의 제조

2.1.1 사용재료

비소성 인공골재(Non-Sintering Artificial Aggregate)의 제조를 위한 도시 쓰레기 소각 비산재는 I시 소각장에서 발생하는 것을 채취하여 그대로 사용하였다. 고형화를 위한 결합재로 시멘트는 국내 D사의 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 OPC라 함)를 사용하였으며, 국내 K제철에서 배출되는 고로슬래그(Blast-Furnace Slag, 이하 BFS라 함), 비정제 플라이애쉬(Pulverized Fly-Ash, 이하 FA라 함, 무연탄계 서천산)와 N사에서 배출되는 페인산석고(Phosphogypsum, 이하 PG라 함) 등의 산업부산물을 결합재로 사용하여 경제성을 확보하고자 하였다. 사용재료의 화학적 조성은 표 1과 같다.

표 1 사용된 재료의 화학적 성질

Composition Type	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	LOI
OPC	21.09	4.84	-	2.39	3.32	63.85	0.29	1.13	-	-	3.09	-
MWFA	5.74	2.61	0.53	0.80	2.00	30.49	3.79	3.28	0.06	1.22	-	15.44
BFS	34.51	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

2.1.2 인공골재의 제조

표 2는 인공골재를 제조하기 위한 배합으로 비산재와 바인더의 혼입량을 중량대비 1:1을 기준으로 하였으며, 시멘트의 혼입량을 감소시키고자 고로슬래그, 인산석고, 플라이애쉬를 비산재에 대해 중량비로 일정비율 혼합하였다. 또한 골재의 표면에 잔존할 수 있는 중금속의 확실한 밀봉효과를 위해 시멘트 코팅을 실시하였다. 인공골재의 제조는 디스크 타입의

표 2 인공골재 배합

Type	MWFA	Binder			
		OPC	BFS	PG	FA
AA	50	40			10
AB		2.5	22.5	10	15

성형기를 이용하여 제조하였으며 표 3에 사양을 나타내었다. 제조된 인공골재는 28일동안 20±5℃의 조건에서 수중양생 하였으며 쇄석과 동일하게 입도를 조정한 후 사용하였다. 인공골재의 환경안정성을 평가 위하여 KSLT와 EP법에 의하여 중금속 용출실험을 실시한 결과 표 4와 같이 용출기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 이는 본 실험에서 사용된 플라이애쉬가 무연탄을 사용한 비정제 플라이애쉬로 다량의 미연소 탄소를 함유하고 있기 때문으로 사료되었다. 미연소 탄소의 표면이 매우 불안정하여 화학적으로 여러 작용기들이 결합하기 쉬우며, 물리적으로도 탄소구조 중에 다량 존재하는 다양한 크기의 미세기공으로부터 모세관 압력이나 분자간 인력에 의해 피흡착질이 흡착되기 쉽게 되어 중금속이 플라이애쉬의 탄소성분에 흡착된 것으로 사료되었다. 또한 인산석고와 고로슬래그의 수화반응에 의한 치밀한 수화조직을 형성하여 수용성 중금속은 수산화물로 불용화시키고, 수화반응중 생성된 에트린가이트 및 CSH 등의 치밀한 수화물에 의해 중금속 고정화된 것으로 판단된다.

표 3 디스크타입 성형기의 사양

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

표 4 중금속 용출실험 결과

Type	KSLT					EP				
	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
A A	0.062	0.114	0.059	0.031	0.026	0.089	0.160	0.039	0.058	0.046
A B	N.D	0.055	0.021	N.D	0.131	N.D	0.065	0.086	N.D	0.085

2.2 인터로킹 블록의 제조

인터로킹 블록의 제조에 사용된 재료는 쇄석과 세척사를 이용하였으며 쇄석의 일부분을 인공골재로 치환하였다. 사용된 재료의 물리적 성질은 표 5에 나타낸바와 같다.

표 5 골재의 물리적 성질

골재의 종류	비중	조립율(F.M)	흡수율(%)	단위용적중량 (ton/m ³)	실적률(%)
쇄 석	2.62	6.77	1.98	1.6	53.1
세 척 사	2.51	2.85	2.59	1.8	58.6
인 공 골 재	1.86	6.53	15.3	1.3	61.3

인터로킹 블록의 배합은 기존 공장 시제품의 배합비를 참조하여 표 6과 같이 하였는데 실험실에서 공시체 성형성을 고려하여 W/C는 40%로 상향조정 하였다. 쇄석은 입경이 최대 13mm의 것을 사용하였으며 쇄석에 대하여 인공골재를 30%까지 용적 치환하였다.

표 6. 인터로킹 블록의 배합

	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	용 적 배 합(ℓ/m ³)				중량배합(kg/m ³)			
				C	S	G	AA	C	S	G	AA
AA-1	40	65	160	127	434	234	0	400	1129	608	0
AA-2						210	23			547	47
AA-3						168	42			438	84
AA-4						118	50			306	101

** AA : 도시쓰레기 소각 비산재 인공골재

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하였고, 각각의 공시체는 Ø10×20 cm와 6×6×24cm의 성형몰드에 넣고 7초 동안 진동기로 다진 후 80kgf/cm²의 하중을 가하여 제작하였다. 제작된 공시체는 탈형 후 20±5℃의 조건에서 수중양생 하였으며 7, 28일 재령에서 시험을 실시하였다.

단위용적중량과 흡수율은 KS F 2409 및 4419의 규정에 따라 측정하였으며 압축강도와 휨강도 시험은 KS F 2405와 KS F 4419의 규정에 따라 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 단위용적중량 및 흡수율

굳지 않은 콘크리트의 단위용적중량은 인공골재의 종류에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았으나 인공골재의 치환율에 따라서는 2.5~2.6ton/m³로 나타났다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 전체적으로 인공골재의 치환율이 증가할수록 단위용적중량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 인공골재의 비중이 쇠석에 비해 0.6~1.0ton/m³정도 낮기 때문이며, 소각재 인공골재를 이용하여 인터로킹 블록을 제조할 경우 치환율 및 제조방식에 의한 차이가 나타날 수 있으나 일반 인터로킹 블록에 비해 경량화 효과가 있을 것으로 판단된다.

흡수율은 쇠석에 비하여 인공골재의 흡수율이 높기 때문에 인공골재의 치환율이 증가할수록 흡수율이 약간 증가하는 것으로 나타났으나 큰 차이를 보이지 않았다. 약 10~11%의 분포로 KS F 4419 규정(흡수율 10% 이내)을 약간 상회하는 것으로 나타났다.

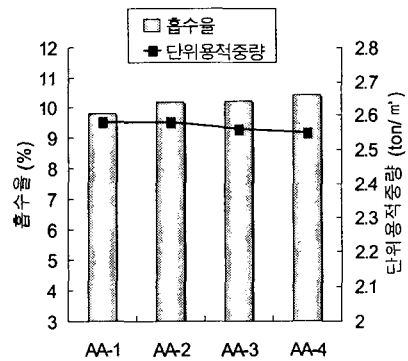


그림 1. 인공골재 치환율에 따른 단위용적중량 및 흡수율 측정결과

3.2. 강도특성

인공골재의 종류에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았으며 치환율에 따른 압축강도는 전반적으로 인공골재의 치환율이 증가할수록 인터로킹 블록의 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 인공골재를 치환하지 않은 AA-1의 경우보다 10% 치환한 AA-2의 경우 압축강도가 오히려 다소 높게 나타났는데 이는 인공골재의 입형이 구형으로 일반 쇠석에 비해 콘크리트의 유동성이 개선되어 몰드 성형

시 다짐이 밀실하게 이루어졌고 10%의 혼입은 콘크리트 블록에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 그러나 인공골재의 치환율이 증가함에 따라 일반 쇄석에 비해 인공골재의 강도가 약하고, 쇄석에 비해 표면이 매끄러워 시멘트 수화물과 부착강도가 좋지 않기 때문에 강도가 점차 감소한 것으로 판단된다.

3.3 휨강도 시험

휨강도는 보차도용 인터로킹 블록에서만 요구되는 물성으로서 KS F 4419에서는 보도용인 경우 $4.9\text{N/mm}^2(50\text{kgf/cm}^2)$ 이상, 차도용은 $5.9\text{N/mm}^2(60\text{kgf/cm}^2)$ 이상으로 규정하고 있다. 본 실험에서 인공골재를 치환한 인터로킹 블록의 경우 휨강도는 압축강도와 비슷한 경향을 보이고 있으며 대부분의 경우 $60\sim 100\text{kgf/cm}^2$ 으로 KS 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났으나 인공골재의 치환율이 20% 이상일 경우 휨강도의 감소가 두드러지게 나타났다.

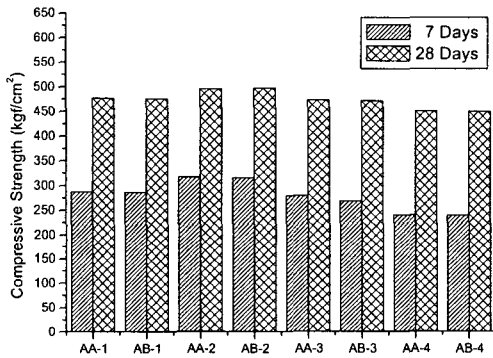


그림 2. 인공골재 치환율에 따른 압축강도 측정결과

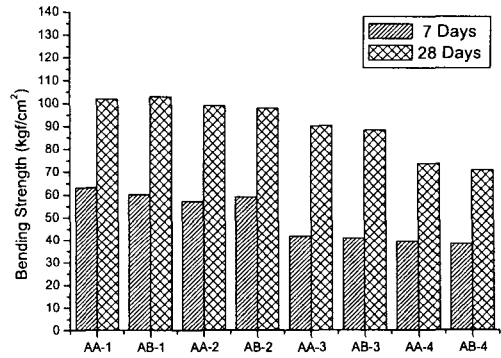


그림 3. 인공골재 치환율에 따른 휨강도 측정결과

4. 결론

도시쓰레기 소각장에서 발생하는 비산재를 저가의 무기계 결합재로 고형화하여 비소성 인공골재를 제조한 후 이 골재를 인터로킹 블록에 적용하여 그 활용 가능성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인공골재를 콘크리트 인터로킹 블록의 굵은골재로서 10~30% 이용할 경우 단위용적중량은 인공골재의 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 흡수율은 큰 차이를 보이진 않았으나 치환율이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 인공골재의 치환율에 따른 콘크리트 블록의 압축강도 및 휨강도는 전반적으로 인공골재의 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나 인공골재를 10% 치환한 경우에는 콘크리트 블록의 강도에 큰 영향을 미치지 않았고 거의 동등이상의 강도를 발현하였다.

3) 종합적으로 도시 쓰레기 소각 부산재를 이용한 비소성 골재를 인터로킹 블록의 제조 시 쇄석에 대해 10~20%정도 대체하여 사용하면 품질의 큰 저하 없이 활용이 가능하리라 판단되며 이러한 활용방안은 도시 쓰레기 소각 부산재의 고화·매립에 의한 처리방법에 비하여 더욱 환경친화적이고 안정적인 처리방안으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 소양섭외 2인, “제지 슬러지 소각회를 이용한 비소성 인공골재의 제조 및 적용”, 대학건축학회 논문집, 2000, vol.16, No.8, pp.59~66.
2. 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 開發”, 日本建築学会大会 學術講演梗演集(東北), 2000, pp.603~604.
3. “소각재를 이용한 다공성 보도블록 제조기술 개발”, 건교부 1차년도 결과보고서, 전북대학교, 2002.