

ORIGINAL ARTICLE

유동상식 소각로에서 발생하는 폐유동사(廢流動床) 처리 및 재활용 방안

이승원*

동의대학교 환경공학과

A Study on Treatment and Recycling of Waste Fluid Sand from the Fluidized Bed Incinerator

Seung-Won Lee*

Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

Abstract

Using the waste(sand wastr and boiler ash) in fluidized bed inciverator, lightweight aggregate concrete was produced and a recycling plan was prepatred. The first, the result of the leaching test shows that the waste fluid sand and boiler ash did not exceed the effluent standard. This indicates that there is no harmful effect for recycling. The second, in the lightweight aggregate test using waste fluid sand and boiler ash, the sample that combined cement, waste fluid sand, and sand showed the highest compressive strength, and the mix proportion was 10: 7: 3. Lightweight aggregate concrete that combined cement, waste fluid sand, boiler ash, and sand had a low compressive strength by and large. The third, the same results were identified in the relation between the content of SiO₂ and that of Na₂O. As the SiO₂ content is lowered, the overall viscosity and plasticity of the concrete also decrease, which is not a good condition to form concrete. As for Na₂O, as the content increases, the viscosity of the sample and the viscosity of the cement are remarkably lowered, and the strength of the finished concrete is lowered. Therefore, it was concluded that the higher the content of SiO₂ and the lower the content of Na₂O, the more suitable it is to mix with cement to produce concrete. Fourth, from the fluidized bed incinerator currently operated by company A in city B, a total of 14,188 tons/year were discharged as of 2016, including 8,355 tons/year of bottom ash (including waste fluid sand) and 5,853 tons/year of boiler ash. The cost for landfill bottom ash and boiler ash discharged is 51,000 won/ton, and the total annual landfill cost is 723,588,000 won/ year. Assuming that the landfill tax to be applied from the year 2018 is about 10,000 won/ton, and if there is no reduction in waste disposal charge, an additional landfill tax of 141,880,000 won/year will be imposed. Consequently, the sum total of the annual landfill cost will be 865,468,000 won/year. Therefore, if the entire amount is used for recycling, the annual savings of about 8.7 billion won can be expected.

Key words : Lightweight aggregate, Leaching test, Boiler ash and waste fluid sand recycle, Recycle cement

1. 서론

우리나라에서 폐기물을 처리하는 방법에는 크게 매립,

소각, 재활용(Ministry of environment, 2019)이 있으며 일반적으로 폐기물을 수거하여 재활용 할 수 있는 부분을 제외한 나머지는 소각한 뒤 매립을 하는 방식을

Received 26 August, 2020; Revised 7 October, 2020;

Accepted 9 November, 2020

*Corresponding author: Seung-Won Lee, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

Phone: +82-51-890-1870

E-mail: 12967@deu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

택하고 있다. 가장 높은 비율을 차지하는 재활용은 처리 과정 중 불필요한 비용 소모 등 효율적인 측면에서 문제를 야기하고 있다. 매립은 지속적인 매립지 확보에 어려움을 겪고 있으며 폐기물의 배출량이 갈수록 증가됨에 따라 예상되는 매립지의 기대수명이 점점 감축되고 있다. 또한 매립된 폐기물이 토양의 2차 오염의 원인이 될 수 있어 지속적인 관리가 필요한 실정이다. 이러한 상황에서 우리나라에서는 폐기물을 짧은 시간에 매우 안정적으로 처리할 수 있는 소각기술로 시야를 넓혀야 한다.

이러한 관점에서 급속한 산업화와 경제발전이 지속될수록 소각기술을 더욱 더 발전시키고 이를 이용한 폐기물 처리의 비율을 늘려야 한다.

소각은 대부분 재활용할 수 있는 폐열 및 고형연료를 확보할 수 있을뿐더러 매립지의 수명도 효과적으로 늘릴 수 있다. 또한 소각이 완료된 후의 소각재는 수분까지도 거의 제거된 상태이기 때문에 바로 매립이 가능한 정도에 이르렀다.

환경부에서 발행한 ‘전국 폐기물 발생 및 처리 현황 (2018년도 수정본)’에 따르면 최근 5년간 소각공정으로 처리되는 폐기물은 2014년 11,531 ton/day, 2015년 12,075 ton/day, 2016년 12,389 ton/day, 2017년 12,017 ton/day, 2018년 12,429 ton/day로 점차적으로 증가하는 추세이다(Ministry of environment, 2019).

따라서 소각공정을 통해 발생하는 소각재를 매립하는 방법 외에 재활용할 수 있는 방안(Park et al., 2001; Lee and Kwon, 2006; Kim et al., 2009)을 모색하여 매립지의 수명연장은 물론 효율적인 재활용자원으로 사용할 수 있게 만드는 것이 필요하다.

그러나 소각재는 현행 폐기물 관리법상 중금속 농도가 비교적 낮기 때문에 일반폐기물로 관리되고 있었으나 유해성 논란이 끊이지 않고 있었으며 또한 최근 일부 소각재에서 유해중금속이 기준치 이상 검출되어 매립장 반입제한 조치가 취해져 일부 수도권 소각장에 소각재가 그대로 방치되어 큰 사회적 문제가 되기도 하였다(Kim, 2014).

본 연구에서는 소각재의 처리 실태를 알아보고 재활용되고 있는 방법들을 검토, 비교하고 현재 유동상식 소각로에서 배출되는 폐유동사의 재활용 가능성에 대해 알아보았다.

추가적으로 유동상식 소각로에서 배출되는 보일러재

와 배합 가능성, 그리고 성분분석을 이용한 함유성분의 함량과 재활용 목표의 관계도 연구하였다. 이는 기존에 활용되고 있는 재활용 방법과 새롭게 이용할 수 있는 방법에서 원재료로 사용되고 있는 것들을 대체할 수 있는가에 대한 것이다. 기존에 사용되고 있는 원재료만큼의 효율이 나온다면 원가절감은 물론 폐기물 재활용, 나아가서는 자원재이용에 따른 환경문제 감소에 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 실험재료

본 연구에서는 B시 소재 생활쓰레기 연료화 및 발전 시설에 가동 중인 유동상식 소각로에서 Fig. 1과 같이 발생하는 폐유동사 및 보일러재를 사용하였으며 물리·화학적 성분분석 결과는 Table 1 및 Table 2에 각각 나타내었다.

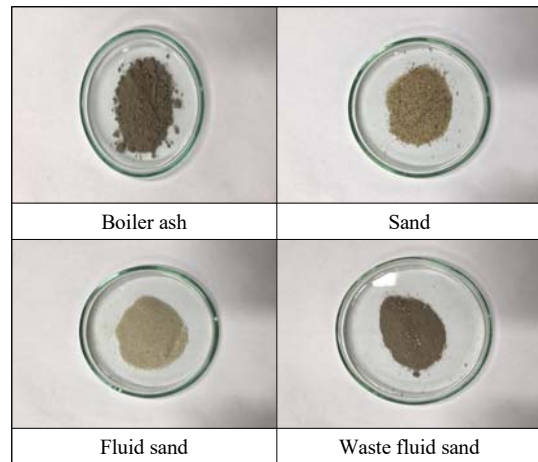


Fig. 1. experimental material.

시멘트는 대중적으로 사용되는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 시멘트의 물리적 및 화학적 조성을 Table 3 및 Table 4에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 시료성형

시료성형의 경우 Table 5와 같은 비율로 배합하였으며, 물의 비율은 시멘트의 50~55%를 첨가하였다.

Table 1. Physical properties of experimental material

Item	Particle size	Specific gravity	Moisture content	Combustible
Fluid sand	0.3~0.7 (mm)	1.58	0.04 (%)	0.001 (%)
Waste Fluid sand	0.1~0.6 (mm)	1.75	0.07 (%)	0.001 (%)
Boiler ash	90~180 (μ m)	1.08	1.21 (%)	0.002 (%)

Table 2. Chemical composition of experimental material

Item(Unit %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Fluid sand	98.1	1.44	0.17	0.02	0.11
Waste Fluid sand	59.8	6.84	5.01	0.73	1.37
Boiler ash	7.5	7.09	1.29	3.35	18.8

<Continue>

(Unit : %)

Item	MgO	CaO	pH
Fluid sand	-	0.08	8.82
Waste Fluid sand	1.04	16.8	12.25
Boiler ash	1.72	18.1	10.97

Table 3. Physical properties of cement in using experiment(Lim, 2002)

Item	Specific gravity	Powder rate(cm^3/g)	Condensation(min)
Cement	3.17	3,214	Average 324

Table 4. Chemical composition of cement in using experiment

Item(Unit %)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
Cement	61.64	22.02	6.12	3.01	2.69

<Continue>

(Unit : %)

Item(Unit %)	SO ₃	Ig-Loss
Cement	2.40	0.96

최종적으로 시료를 배합 후 50×50×50 mm 거푸집에 성형하여 공시체를 제작하였다.

2.2.2. 유해물 함유량 시험 및 압축강도 측정

경량골재 콘크리트의 유해물 함유량 한도를 Table 6에 나타내었다. 유기불순물 시험은 KS F 2510(Korean Agency for Technology and Standards, 2017), 얼룩은 KS F 2468(Korean Agency for Technology and Standards, 2017) 강열감량시험은 KS F 5120(Korean Agency for Technology and Standards, 2017), 부림률 시험은 KS F 2531(Korean Agency for Technology and Standards, 2017)의 시험방법으로 측정하였다.

연구에서는 폐기물공정시험기준에 준하는 방식으로 용출시험을 실시하였으며, 중금속 및 금속류는 기기분석법으로 유도결합플라즈마-원자발광분광법(HORIBA Jobin Yvon사, JY ACTIVA ICP-AES)으로 진행하였다.

또한, Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었듯이 압축강도의 경우 50×50×50 mm의 거푸집을 사용하여 5일간 성형하여 측정하였다. 제작한 시료의 강도 측정은 강도측정기(KSTM사 Hydraulic Servo Universal Testing Machine 100KN)를 사용하였다.

시험체는 KS F 2403「콘크리트의 강도 시험용 공시체

Table 5. Mixing ratio of experimental material

Item	C/W	C	W	S	N	B
W ₁₀₀	2:1	100	200			
S ₁₀₀	2:1	100		200		
N ₁₀₀	2:1	100			200	
B ₁₀₀	2:1	100				200
W ₆₀ S ₄₀	2:1	100	120	80		
W ₇₀ S ₃₀	2:1	100	140	60		
W ₈₀ S ₂₀	2:1	100	160	40		
W ₉₀ S ₁₀	2:1	100	180	20		
W ₄₀ S ₄₀ B ₂₀	2:1	100	60	80		60
W ₃₅ S ₃₀ B ₃₅	2:1	100	70	60		70
W ₄₀ S ₂₀ B ₄₀	2:1	100	80	40		80
W ₄₅ S ₁₀ B ₄₅	2:1	100	90	20		90

※ C : Cement, W : Waste fluid sand, S : Sand, N : Fluid sand, B : Boiler ash
W₆₀S₄₀ : W 60%, S 40%, W₄₀S₄₀B₂₀ : W 40%, S 40%, B 20%

Table 6. Standards for the content of harmful substances of lightweight aggregate concrete

Item	Maximum value
Combustible	5%
Stains	No dark stains (If heavy dirt occurs Fe ₂ O ₃ 1.5 mg or less)
Organic impurities	The color of the test solution in not darker than the standard color.
Floating particle ratio	10%

**Fig. 2.** Steel form and strength meter(Hydraulic Servo Universal Testing Machine 100KN) in using experiment.

제작방법에 따라 제작하고, 습윤양생(20±2℃, RH 95±5%)을 실시하였으며, 압축강도를 KS F 2405에 따라 단면적을 계산한 후, 공시체가 시험기의 가압판 중앙

에 위치하도록 하고, 매 초당 0.6±0.4 MPa의 속도로 공시체가 파괴될 때까지 하중을 가하였다.

Table 7. Results of heavy metals detection

(unit : mg/ℓ)

Item	As	Pb	Cd	Hg	Cr	Cu
Standard	1.5	3	0.3	0.005	-	3
W	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.19	0.02
B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Table 8. Hazardous substance content test results of W₁₀₀, S₁₀₀, N₁₀₀, B₁₀₀

Item	W ₁₀₀	S ₁₀₀	N ₁₀₀	B ₁₀₀	Standard
Combustible	3.9	1.5	2.1	6.4	5% less
Stains	20	10	10	20	0-100
Organic impurities	×	×	×	×	standard color less
Floating particle ratio	0%	0%	0%	0%	10%

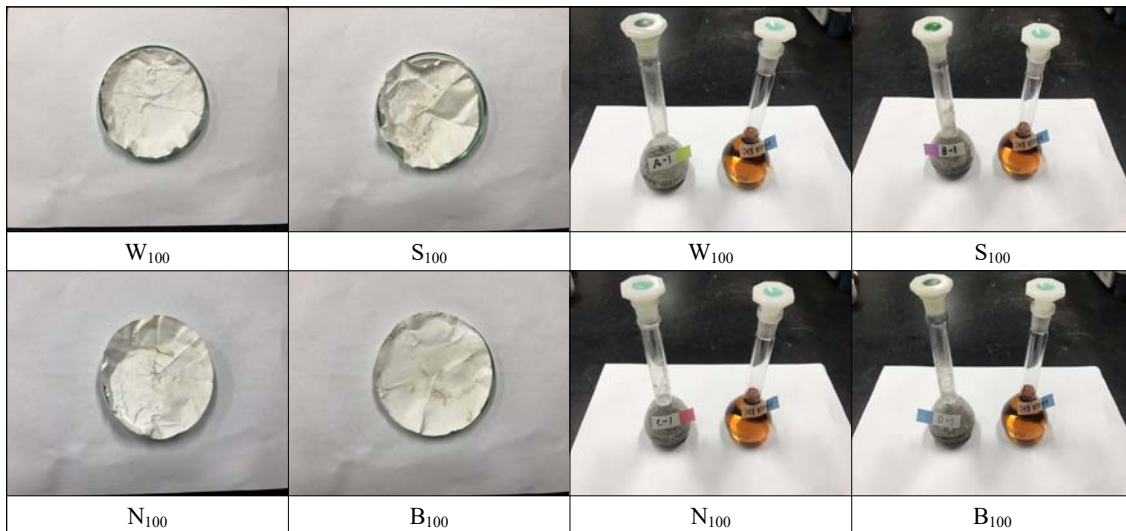


Fig. 3. Stain test results of W₁₀₀, S₁₀₀, N₁₀₀, B₁₀₀.

Fig. 4. Organic impurities test results of W₁₀₀, S₁₀₀, N₁₀₀, B₁₀₀.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용출시험 후 유해성 평가

본 연구에서 사용된 시료의 유해성 평가를 실시하였으며, 이에 따른 결과 Table 7에 나타내었다. 용출시험결과 폐유동사 및 보일러재는 허용기준에 모두 만족하였으며, 재활용하는데 문제가 없는 것으로 조사되었다.

3.2. 중량혼합비에 따른 인공 경량골재 품질특성 평가

3.2.1. 유해물 함유량의 한도 시험 결과

본 연구에서는 폐유동사 및 보일러재를 모래 대체재

로 이용하였으며, 시멘트(C)와 폐유동사(W), 모래(S), 보일러재(B) 및 신유동사(N)의 비율을 1:2로 배합하여 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 시험을 실시하였다. 또한 시험방법의 경우 유기불순물 시험은 KS F 2510, 열록은 KS F 2468, 강열감량시험은 KS F 5120, 부립률 시험은 KS F 2531의 시험 방법으로 측정하였으며 이 결과를 혼합비율에 따라 아래와 같이 나타내었다.

① W₁₀₀, S₁₀₀, N₁₀₀, B₁₀₀

유해물 함유량 한도를 평가한 결과 W₁₀₀, S₁₀₀ 및 N₁₀₀의 경우 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 4항목 모두

Table 9. Hazardous substance content test results of W₆₀S₄₀, W₇₀S₃₀, W₈₀S₂₀, W₉₀S₁₀

Item	W ₆₀ S ₄₀	W ₇₀ S ₃₀	W ₈₀ S ₂₀	W ₉₀ S ₁₀	Standard
Combustible	3.2	3.7	4.3	4.7	5% less
Stains	10	10	20	20	0-100
Organic impurities	×	×	×	×	standard color less
Floating particle ratio	0%	0%	0%	0%	10%

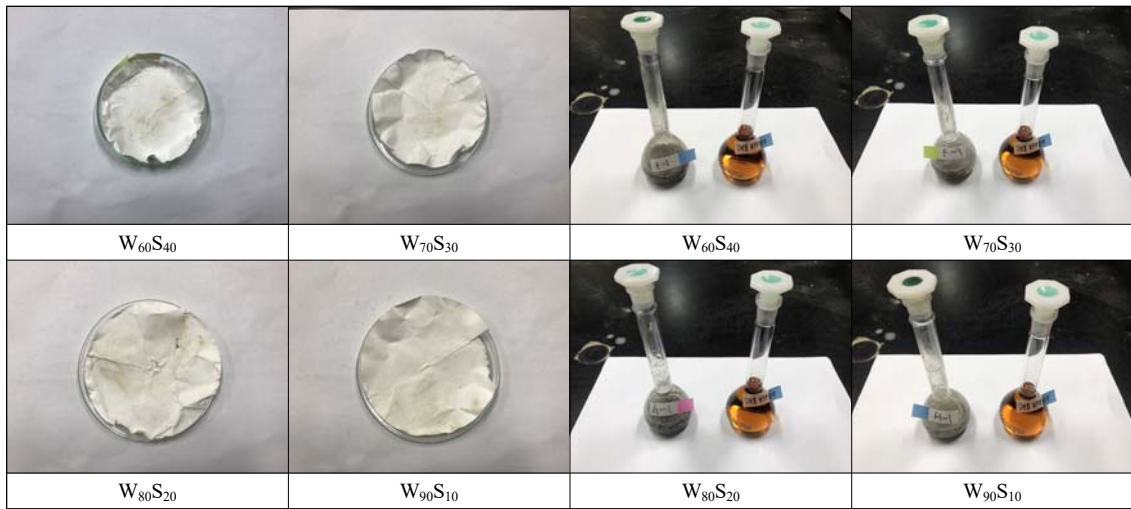


Fig. 5. Stain impurities test results of W₆₀S₄₀, W₇₀S₃₀, W₈₀S₂₀, W₉₀S₁₀.

Fig. 6. Organic impurities test results of W₆₀S₄₀, W₇₀S₃₀, W₈₀S₂₀, W₉₀S₁₀.

유해성 기준에 만족하였으나, B₁₀₀은 강열감량에서 5%보다 다소 높은 5.3%의 결과를 나타내었다.

② W₆₀S₄₀, W₇₀S₃₀, W₈₀S₂₀, W₉₀S₁₀

본 연구에서는 폐유동사를 모래 대체재로 활용하기 위해 폐유동사(W)와 모래(S)를 비율별(60:40, 70:30, 80:20, 90:10)로 시료를 배합하여 유해물 함유량 한도 시험인 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 시험을 실시하였으며 그 결과를 Table 9에 나타내었다.

폐유동사는 SiO₂ 함량이 50% 이상이므로 일정한 압축강도 및 최대하중 역시 클 것으로 예상된다. 또한 입자가 크고 작은 2개의 물질을 배합하여 사용하면 밀도 역시 증가하여 부립률, 압축강도 및 최대하중 등에 이로운 점이 있는 것으로 판단된다.

시험 결과 W₆₀S₄₀, W₇₀S₃₀, W₈₀S₂₀ 및 W₉₀S₁₀의 경우 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 4개 항목 모두 유해성 기준에 만족하는 것으로 조사되었다.

③ W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅, W₄₀S₂₀B₄₀, W₄₅S₁₀B₄₅

본 연구에서는 폐유동사(W)+모래(S)+보일러재(B)를 일정한 비율로 시료를 배합하여 사용하였으며, 배합 비율은 폐유동사와 보일러재를 1:1로 이를 모래와 60:40, 70:30, 80:20, 90:10의 비율로 혼합하였으며, 이를 유해물 함유량 한도 시험인 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 시험을 실시하였다. Table 10에 그 결과를 나타내었다.

폐유동사 및 보일러재는 모래에 비해 입자가 작은 것이 특징이며, 역시 입자가 크고 작은 2개 이상의 물질을 배합하여 사용하면 밀도 역시 증가하여 부립률, 압축강도 및 최대하중 등에 이로운 점이 있는 것으로 판단된다.

시험 결과 W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅ 및 W₄₀S₂₀B₄₀의 경우 부립률, 열록, 강열감량, 유기불순물 4개 항목 모두 유해성 기준에 만족하나 W₄₅S₁₀B₄₅는 강열감량에서 5%가 넘는 것으로 조사되었다. 강열감량의 경우 보일러재의

Table 10. Hazardous substance content test results of W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅, W₄₀S₂₀B₄₀, W₄₅S₁₀B₄₅

Item	W ₄₀ S ₄₀ B ₂₀	W ₃₅ S ₃₀ B ₃₅	W ₄₀ S ₂₀ B ₄₀	W ₄₅ S ₁₀ B ₄₅	Standard
Combustible	4.0	4.5	4.8	5.3	5% less
Stains	20	20	20	20	0-100
Organic impurities	×	×	×	×	standard color less
Floating particle ratio	0%	0%	0%	0%	10%

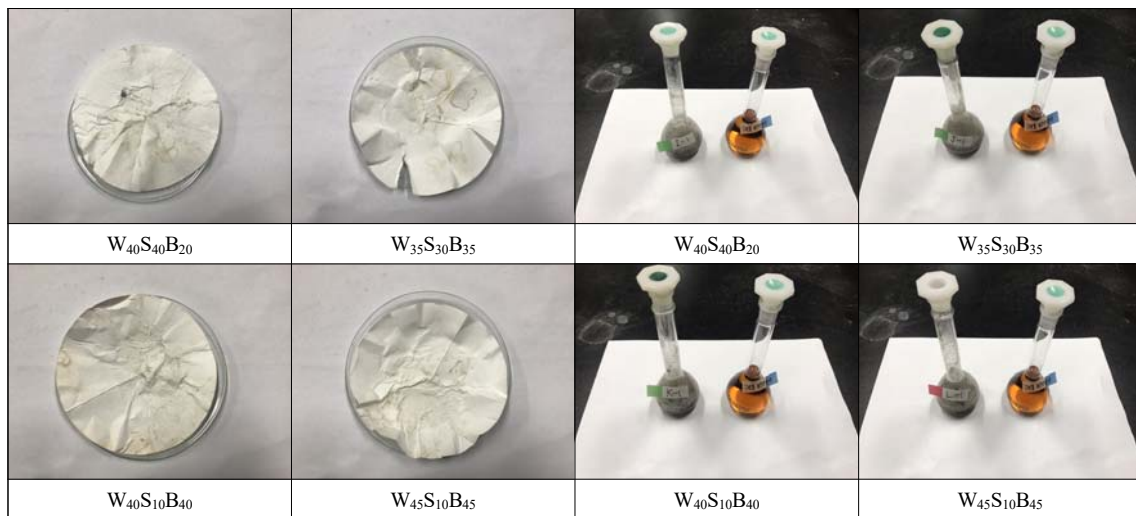


Fig. 7. Stain impurities test results of W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅, W₄₀S₂₀B₄₀, W₄₅S₁₀B₄₅.

Fig. 8. Organic impurities test results of W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅, W₄₀S₂₀B₄₀, W₄₅S₁₀B₄₅.

다소 높은 강열감량 함량으로 인해 기준인 5% 내외에 있어 실제 골재로 이용 시 보일러재 비율을 낮추어야 할 필요성도 있는 것으로 판단된다.

3.2.2. 압축강도 시험결과

① W₁₀₀, S₁₀₀, N₁₀₀, B₁₀₀

본 연구에서는 위와 같은 조건에서 경량골재로서의 중요한 항목인 압축강도를 시멘트(C)+모래(S)(1:2)(시방서) 기준으로 폐유동사(W), 보일러재(B) 및 신유동사(N) 등을 모래와 같은 비율로 혼합하여 강도를 측정해 보았으며 그 결과를 Table 11에 나타내었다.

일반적으로 시멘트+모래의 압축강도의 경우 7.48 MPa로 시방서 기준인 18 MPa에 비해 41.6% 수준으로 측정되었는데 이는 양생기간에 따라 압축강도가 다소 달라지기 때문이다. 보통 5일, 10일, 15일, 20일, 25일 및 28일까지를 양생기간으로 하는데 양생기간이 길어질수록 압축강도 역시 증가하는 경향을 보인다고 일반적으로 보고되

고 있다(Kim, 2010).

본 연구에서는 양생기간을 가장 짧은 5일로 하였으며, 이때 압축강도는 시멘트+모래(1:2)가 약 7~10 MPa로 본 연구결과인 7.48 MPa의 압축강도는 평균 범위 이내임으로 만족한 결과를 나타내었다.

이와 비교하였을 때 신유동사가 포함된 시료에서 14.76 MPa로 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 이는 SiO₂ 성분이 98.1%로 가장 높은 신유동사가 압축강도가 가장 높게 나타났으며, SiO₂ 함량은 보통 가소성 및 결정화, 점성 등에 영향이 있는 것으로 보고되고 있어 특히 결정화, 점성 등의 성질에 영향을 받아 압축강도 역시 증가하는 것으로 판단된다(You, 2000). 또한 Na₂O 성분이 과도하게 높으면 점성도 및 강도가 낮아진다고 보고되고 있다(Lee, 2003). 압축강도가 가장 높은 신유동사의 경우 Na₂O 성분이 0.11%이나 보일러재의 경우 18.8%로 높은 비율을 보였다. 따라서 사용되는 골재의 성분

Table 11. Compressive strength test results of W_{100} , S_{100} , N_{100} , B_{100}

Item	W_{100}	S_{100}	N_{100}	B_{100}	Standard
Cross section(mm ²)		2,500			-
Size(mm ³)		50×50×50			-
Maximum load(KN)	13.80	18.70	36.90	3.10	-
Compressive strength(MPa)	5.52	7.48	14.76	1.24	1:18(sand) 2:15(light weight aggregate)

Table 12. Compressive strength test results of $W_{60}S_{40}$, $W_{70}S_{30}$, $W_{80}S_{20}$, $W_{90}S_{10}$

Item	$W_{60}S_{40}$	$W_{70}S_{30}$	$W_{80}S_{20}$	$W_{90}S_{10}$	Standard
Cross section(mm ²)		2,500			-
Size(mm ³)		50×50×50			-
Maximum load(KN)	47.70	75.30	46.10	24.90	-
Compressive strength(MPa)	19.08	30.12	18.44	9.96	1:18(sand) 2:15(LWA)

따라 압축강도 역시 상관관계가 있는 것으로 조사되었다.

폐유동사 역시 5.52 MPa로 역시 다소 높게 측정되어 시료배합에 따라 충분히 재활용이 가능할 것으로 판단된다. 다만 보일러재의 경우 압축강도가 1.24 MPa로 매우 낮은 것으로 조사되었다. 보일러재의 경우 SiO₂ 함량이 7.5%로 매우 낮으며 Na₂O 성분함량이 18.8%로 SiO₂ 함량보다 과도하게 높아 압축강도가 낮은 것으로 판단된다.

㉔ $W_{60}S_{40}$, $W_{70}S_{30}$, $W_{80}S_{20}$, $W_{90}S_{10}$

폐유동사는 현재 중금속 배출허용기준 이하로 처리 후 폐유동사의 대부분이 매립장으로 매립된다. 그러나 매립을 하지 않고 폐유동사를 재활용 하면 매립에 들어가는 비용을 절감하고 매립장의 기대수명도 늘릴 수 있다.

위의 결과 폐유동사만 사용한 시료의 압축강도가 다소 낮아 폐유동사(W)와 모래(S)를 일정비율(60:40, 70:30, 80:20, 90:10)로 배합하여 압축강도를 측정된 결과를 Table 12에 나타내었다.

먼저 폐유동사와 모래비율이 70:30일 때 압축강도가 30.12 MPa로 가장 높게 측정되었으며, 60:40 및 80:20 비율 역시 19.08 MPa 및 18.44 MPa로 모래 단독으로 사용하였을 때 7.48 MPa에 비해 약 2.5배~4배 정도 압축강도가 높은 것으로 측정되었다. 또한 폐유동사:모래 90:10 비율 역시 모래단독인 7.48 MPa에 비해 높은 9.96 MPa로 폐유동사와 모래를 섞은 배합시료가 단독으로 사용하는 경우

보다 압축강도 및 최대하중 등의 효율이 높은 것으로 나타났다.

이는 위에서 설명하였듯이 폐유동사는 모래에 비해 입자가 작은 것이 특징이며, 역시 입자가 크고 작은 2개 이상의 물질을 배합하여 사용하면 밀도 및 점성 등이 증가하여 압축강도 및 최대하중 등에 이로운 점이 있는 것으로 판단된다. 또한 SiO₂ 함량 역시 50% 이상이므로 일정한 점성력과 가소성 등으로 인해 압축강도 및 최대하중 역시 클 것으로 예상된다.

본 연구에서 폐유동사와 모래비율이 7:3일 때 최대하중 및 압축강도를 나타내는 것으로 조사되었으며, 경제성 부분에서는 9:1의 비율 역시 타당성이 있는 것으로 판단된다.

㉕ $W_{40}S_{40}B_{20}$, $W_{35}S_{30}B_{35}$, $W_{40}S_{20}B_{40}$, $W_{45}S_{10}B_{45}$

폐유동사(W)와 모래(S), 보일러재(B)를 혼합하여 양생하고 압축강도 및 최대하중을 측정된 결과를 Table 13에 나타내었다. 폐유동사와 모래를 섞어 양생한 시료의 최대하중 및 압축강도는 기준에 만족할 만큼 높은 수준으로 결과가 도출되었으나, 보일러재를 첨가하여 양생한 시료에서는 전체적으로 1.76 MPa~2.44 MPa로 매우 낮은 수치를 나타내었다. 이는 폐유동사 및 모래의 이점보다 보일러재의 단점이 확연히 드러나는 결과로 조사되었다.

3.3. 폐유동사의 재활용에 대한 경제성 평가

2018년부터 시행되는 자원순환기본법에 의하여 기준에

Table 13. Compressive strength test results of W₄₀S₄₀B₂₀, W₃₅S₃₀B₃₅, W₄₀S₂₀B₄₀, W₄₅S₁₀B₄₅

Item	W ₄₀ S ₄₀ B ₂₀	W ₃₅ S ₃₀ B ₃₅	W ₄₀ S ₂₀ B ₄₀	W ₄₅ S ₁₀ B ₄₅	Standard
Cross section(mm ²)	2,500				-
Size(mm)	50×50×50				-
Maximum load(KN)	4.40	6.10	5.70	5.70	-
Compressive strength(MPa)	1.76	2.44	2.28	2.28	1:18 (sand) 2:15 (LWA)

처분하던 폐기물들에 대한 폐기물처분부담금이 부과된다. 폐기물처분부담금은 매립·소각하는 폐기물에 부담금을 부과하여 최대한 재활용되도록 유도하는 제도이며, 사업장 폐기물 배출자가 폐기물을 매립, 소각하는 경우 그에 따른 부담금을 부과하는 제도이다. 생활폐기물, 사업장 폐기물, 건설폐기물로 구분하여 처분 종류에 따라 부과요율을 다르게 시행하는데 사업장 폐기물은 가연성 폐기물을 매립 시 25 won/kg, 소각 시 10 won/kg, 불연성 폐기물을 매립 시에는 10 won/kg이 부과된다(Price, 1951).

또한 재활용 촉진을 위해 감면대상도 명시해놓았다. 자가 매립시설에 매립 한 후 3년 이내 재활용하는 경우, 소각 시 열에너지를 50% 이상 회수하여 이용하는 경우, 폐기물부담금 납부자가 동일 제품을 처분하는 경우, 중소기업 중 매출액 120억 원 미만, 지정폐기물, 도서지역, 재난재해폐기물 등 총 7가지이며 최소 50%에서 최대 100%까지 감면받을 수 있다. 따라서 현재 유동층 소각로를 가동하고 있는 곳에서 충분히 부담금도 감면이 가능할 것으로 보인다(Ministry of environment, 2017).

현재 B시의 A사에서 가동되고 있는 유동상식 소각로에서는 2016년 기준 바닥재(폐유동사 포함) 8,335 ton/year, 보일러재 5,853 ton/year으로 총 14,188 ton/year이 배출되었다. 배출되는 바닥재와 보일러재를 매립하는 데 51,000 won/ton이 소요되며 연간 순수 매립비용은 총 723,588,000 won/year이다. 2018년도부터 적용되는 매립세가 약 10,000 won/ton이 된다고 가정하고 처분부담금의 감면이 없다고 가정하면 141,880,000 won/year의 매립세가 추가로 부과되어 연간 매립에 쓰이는 비용은 총 865,468,000 won/year이 될 것이다. 따라서 전량을 재활용하는데 사용한다면 연간 약 87억 원의 경제적 절감효과를 기대할 수 있다.

경량 골재의 평균 판매 가격은 약 55,000 won/ton이

며 현재 매립되고 있는 양을 전량 재활용하여 경량 골재로 제작해서 판매했을 시 이론적으로 약 780,340,000원의 수익이 창출된다고 볼 수 있다.

4. 결론

폐유동사를 이용한 경량 골재 콘크리트를 제작하고 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 폐유동사 및 보일러재는 용출시험결과 배출허용 기준을 초과하지 않았으며 재활용하는데 유해성에 대한 문제가 없는 것으로 조사되었다.

(2) 폐유동사와 보일러재를 사용한 경량 골재 시험에서 시멘트와 폐유동사, 모래를 배합한 시료가 가장 높은 압축강도를 보였으며 이때의 배합비율은 10:7:3이었다. 시멘트와 폐유동사, 보일러재, 모래를 배합한 경량 골재 콘크리트는 전체적으로 낮은 수치를 보였다.

(3) 이와 같은 결과는 SiO₂와 Na₂O의 함량과의 관계에서 알아볼 수 있었다. SiO₂의 함량이 낮아지면 콘크리트의 전체적인 점성이 떨어지고 가소성 역시 떨어지므로 콘크리트가 만들어지기 좋은 조건이 될 수 없다. Na₂O의 경우는 함량이 증가할수록 시료의 점성을 떨어뜨리고 시멘트의 접착성을 현저히 떨어뜨리고 완성된 콘크리트의 강도를 저하시킨다. 따라서 SiO₂의 함량이 높고 Na₂O의 함량이 낮을수록 시멘트와 배합하여 콘크리트를 만들기에 적합하다고 판단되었다.

(4) 콘크리트 제작 시 입자의 크기도 고려해야 한다. 입자의 크기가 클수록 밀도가 낮아져 콘크리트의 강도가 약해질 수 있다. 반대로 입자의 크기가 작아지면 밀도가 큰 대신 시멘트가 제 역할을 할 수 없어 마찬가지로 강도가 약해진다. 입자의 크기와 밀도의 상관관계로 부립률을 설명할 수 있다. 밀도가 낮아질수록 부립률이 증가하여 콘크리트를 사용하는 데 부적합하다고 판단할 수

있다.

(5) 현재 B시의 A사에서 가동되고 있는 유동상식 소각로에서는 2016년 기준 바닥재(폐유동사 포함) 8.33 5 ton/year, 보일러재 5,853 ton/year으로 총 14,188 ton/year이 배출되었다. 배출되는 바닥재와 보일러재를 매립하는 데 51,000 won/ton이 소요되며 연간 순수 매립비용은 총 723,588,000 ton/year이다. 2018년도부터 적용되는 매립세가 약 10,000 won/ton이 된다고 가정하고 처분부담금의 감면이 없다고 가정하면 141,880,000 won/year의 매립세가 추가로 부과되어 연간 매립에 쓰이는 비용은 총 865,468,000 ton/year이 될 것이다. 따라서 전량을 재활용하는데 사용한다면 연간 약 87억 원의 경제적 절감효과를 기대할 수 있다.

B시 뿐만 아니라 전국에서 가동하고 있는 유동상식 소각로에서 발생하는 바닥재 등을 고려한다면 상당한 경제적 이익을 가져올 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Kim, H. S., Jung, B. G., Kang, D. H., 2009, Quality characteristic of waste ash brick with incineration ash of municipal solid wastes, *J. of Korea Society for Environmental Technology*, 10(1), 36-41.
- Kim, I. K., 2010, Comparison of shrinkage strain with compressive strength and curing condition in concrete members, Master Thesis, Gangneung-Wonju National University, Korea.
- Kim, J. W., 2014, A Study on characteristics of concrete using incineration ash, Master Thesis, Kongju National University, Korea.
- Korean Agency for Technology and Standards., 2017, Method of chemical analysis of portland cement.
- Korean Agency for Technology and Standards., 2017, Standard test method for content of floating particles in lightweight coarse aggregates.
- Korean Agency for Technology and Standards., 2017, Standard test method for iron staining materials in lightweight concrete aggregates.
- Korean Agency for Technology and Standards., 2017, Testing method for organic impurities in sands for concrete.
- Lee, K. J., Kwon, Y. H., 2006, The application to soft ground improvement material using waste residual from incineration, *J. of Korea Society for Environmental Technology*, 7(2), 133-142.
- Lee, S. H., 2003, About pozzollanic reaction, *J. of the Korea Concrete Institute*, 158, 40-44.
- Lim, B. R., 2002, A Study on the strength of lightweight concrete with artificial aggregate, Master Thesis, Kyonggi University, Korea.
- Ministry of environment., 2017, Framework act on resources circulation.
- Ministry of environment., 2019, Waste generation and disposal status.
- Ministry of environment., 2019, White paper of environment.
- Park, S. S., Kim, K. S., Kang, H. Y., 2001, A Study on the interlocking block using wastewater sludge ash as substituting for fine aggregate, *J. of the Korean Society for Environmental Technology*, 2(1), 75-80.
- Price, W. H., 1951, Factors influencing concrete strength, *J. of America Concrete Institute*. 47(6), 417-432.
- You, S. Y., 2000, Diatomaceous earth and its application, *J. of Mineral Science and Industry*, 13(1), 39-50.

• Assistant Professor. Seung-Won Lee
Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University
12967@deu.ac.kr