

무기계 건설폐기물을 이용한 재생시멘트 배합설계에 관한 이론적 제안

Theoretical Proposal for the Mix Design of Recycled Cement Utilizing Inorganic Construction Wastes

김지훈¹ · 태성호^{1*} · 송 훈² · 신현욱²Ji-Hoon Kim¹ · Sung-Ho Tae^{1*} · Hun Song² · Hyeon-Uk Shin²

(Received August 17, 2016 / Revised September 2, 2016 / Accepted September 8, 2016)

Until now, the construction material industry has been recognized as a typical environmental destruction industry. However, recently, in order to reduce CO₂ emission, the main cause of environmental problems, lots of studies have been done about recycling industrial by-products and construction wastes. Therefore, the purpose of this study is to confirm whether it is possible to use as an alternative material in cement production process as a part of the development of recycled cement using an inorganic construction waste. For this study, the inorganic construction wastes was collected and analyzed each chemical component by XRF(X-ray Fluorescence). Also, the inorganic construction wastes were combined based on the chemical component of the cement, to perform this analysis. As a result, when the inorganic construction wastes was properly combined, it is possible to consider the development of the recycled cement used the inorganic construction wastes.

키워드 : 재생시멘트, 무기계, 건설폐기물**Keywords** : Recycled cement, Inorganic, Construction wastes

1. 서론

최근 건설 산업은 산업경제 발전에 있어 사회간접자본의 형성이라는 차원에서 그 영향이 매우 크며 더불어 사회와 환경적인 측면에서도 지속가능한 산업이 되기 위해 노력하고 있다. 하지만, 이러한 노력에도 불구하고 건설 산업은 폐기물 발생량의 증가 및 처리방안에 대한 사회적 문제와 재료의 생산 과정에서 배출되는 온실가스에 의한 지구환경 오염 및 자원고갈에 대한 환경적 문제에 직면하고 있다.

한편, 건설재료 산업에서 배출되는 온실가스 양은 전체 건설 산업에서도 대략 13~15%를 차지하고 있으며 온실가스 배출 주요 산업으로 분류된다. 이와 관련하여 다양한 연구기관과 각 종 분야에서는 투입자원 및 폐기물 저감을 통한 환경부하 저감형 재료 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 대표적으로 정부에서는 「제2차 건설폐기물재활용기본계획」을 세우는 등 건설폐기물

을 재활용하는 효율적인 정책을 제안하고자 노력 하고 있다(Ministry of Environment 2011). 하지만, 건설재료 산업에 있어서 기존에 건설폐기물의 재활용연구는 재활용률을 쉽게 높일 수 있는 페콘크리트를 중심으로 순환골재와 부산미분말에 관한 연구가 주를 이루고 있으며 페타일, 페시멘트블럭, 폐석고보드 등 무기계 건설폐기물을 재이용한 건설재료의 제 2차 제품 개발에 있어서는 그 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 무기계 건설폐기물을 이용한 환경부하 저감형 재생시멘트 개발연구의 일환으로 배합설계에 관한 이론적 제안을 목적으로 한다.

본 연구는 이를 위해 국내 건설 산업에서 발생하는 건설폐기물의 종류와 발생 추이를 분석하고 관련된 연구동향을 분석함으로써 기존 시멘트 제조의 원재료로 대체 가능한 무기계 건설폐기물에 대하여 분석하였다. 또한, 앞서 기존문헌고찰을 바탕으로 실제 발생하는 무기계 건설폐기물을 수집하여 각 화학성분을 분석 하였으며, 무기계 건설폐기물이 혼합된 환경부하 저감형 재생시멘트의

* Corresponding author E-mail: jnb55@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건축시스템공학과 (Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Kyonggi-do, 15588, Korea)²한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju, 52851, Korea)

배합설계를 이론적으로 도출하였다. 마지막으로 실제 클링커 소성에 따른 광물의 조성되는 성분을 예측하기 위해 보그(Bogue)식과 화학적 인자들에 의한 예측식을 활용하여 분석하였으며, Fig. 1은 본 연구의 프로세스를 나타낸다.

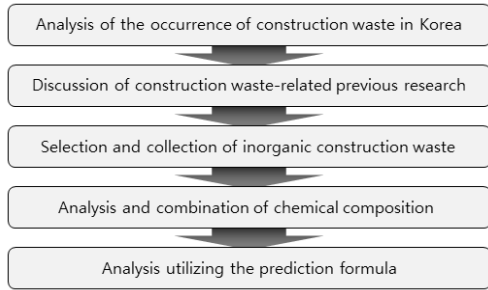


Fig. 1. The process of research

2. 이론적 고찰

2.1 국내 건설폐기물의 발생현황

다음 Fig. 2는 환경부·한국환경공단의 통계자료인 “전국 폐기물 발생 및 처리 현황”에 의한 연도별 폐기물 발생현황을 나타낸다 (Ministry of Environment 2013). 과거 국내에서 발생하는 건설폐기물의 양은 전체 폐기물 발생량 가운데 생활폐기물과 사업장 일반폐기물에 비해 꾸준히 증가하였으며 이후 2008년을 기점으로 매년 증가와 감소를 반복하고 있다. 하지만, 국내 건설폐기물은 여전히 전체 폐기물 가운데 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 2014년에는 47.7%로 전체 폐기물 구성비 가운데 가장 많은 비율을 차지했다. 또한, 최근 연립주택이나 아파트의 재건축 연한이 40년

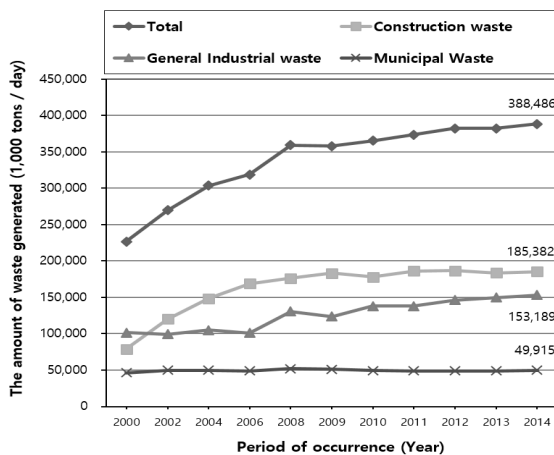


Fig. 2. Current status of waste generation

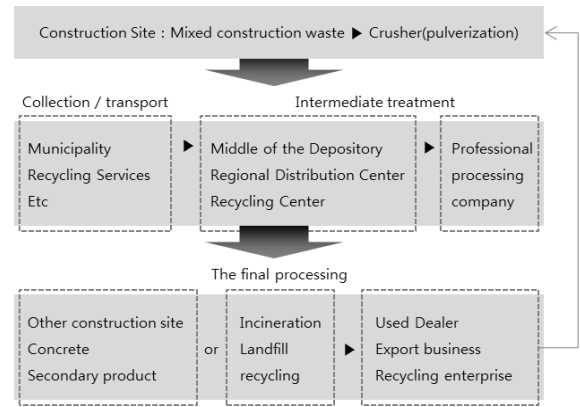


Fig. 3. Flowchart of a process of construction waste

에서 30년으로 단축됨과 동시에 1990년대 건설된 건축물의 재건축 및 리모델링 현상이 증가 될 것으로 예상되어 발생하는 국내 건설폐기물이 차지하는 비율은 더욱더 증대 될 것으로 예상된다. 실제 건축물의 설계단계에서부터 시공, 운영, 해체단계에 이르러 전과정에서 배출되는 다량의 건설폐기물은 다음 Fig. 3에 나타난 바와 같이 분류되어 처리된다. 수집·운반업체는 건설현장으로 부터 건설폐기물을 인수받아 자체 집하장에서 성상별로 1차 선별한 후 재생 가능한 폐기물은 중간집하장, 지역물류센터, 재활용센터, 전문처리업체 등 중간처리업체에 위탁 처리되며, 이 후 콘크리트 2차 제품 등으로 재활용 되거나 잡쓰레기 등은 최종 처분장으로

Table 1. Classification and occurrence of construction waste (Unit: Ton/Day)

Type	Classification	2012	2013	2014
I	Waste wood	682.7	703.5	865.6
	Waste synthetic resin	1,261.1	1,695.3	1,586.1
	Waste fiber	20.3	16.6	65.3
	Waste wallpaper	0.3	2.3	2.2
II	Waste concrete	117,753.5	111,653.2	114,907.8
	Waste ascon	35,737.7	35,397.6	33,725.3
	Waste brick	2,016.1	2,262.2	1,753.4
	Waste block	914.1	982.5	607.5
	Waste roofing tile	27.1	35.8	32.1
	Waste soil	5,094.2	5,066.5	5,863.9
	Waste tile or ceramics	22.6	46.9	65.7
	Construction sludge	643.9	1,052.1	707.1
	Waste metal	2.4	0.1	0.1
	Waste glass	4.4	5.5	104.1
IV	Mixed construction waste	22,275.6	24,334.1	24,769.8
	Waste board	142.1	195.6	270.6
	Waste panel	4.0	2.8	3.7
	Etc	26.5	85.1	53.1
Total		186,628.5	183,537.7	185,382.4

I :Combustibility, II :Non-combustibility

III:Construction and Demolition Waste, IV:Mixed Wastes (I + II)

직접 반출되어 소각, 매립지등으로 운반 처리되는 형태가 많다. 국내 발생하는 건설폐기물은 아래 Table 1과 같이 분류되어 처리되고 있으며, 폐콘크리트와 폐아스콘이 가장 많이 배출되고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 재활용이 가능성이 있는 다양한 무기계 건설폐기물은 대부분 불연성 폐기물 및 건설폐재류에 속해있다 (Kim 2016; Oh 2014).

2.2 국내 건설폐기물의 연구동향

최근 ‘지속가능한(sustainable)’이라는 단어가 우리의 사회적 인식가운데 자리 잡고 있으며 이에 따른 건설 산업에서도 건설폐기물의 리사이클에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 국내 시멘트 제조 및 콘크리트 관련 산업에서는 부족한 골재의 수급을 보충하기 위해 폐콘크리트 처리 이후 생산되는 순환(재생)골재에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 실제 실용화단계에 이르러 생산까지 되고 있음을 볼 수 있다. 다음 Fig. 4는 폐콘크리트에서 순환(재생)골재가 생산되는 프로세스를 나타낸다. 하지만, 현재 순환(재생)골재의 경우 사회적 인식 등 여러가지 제약에 의해 실질적인 구조재로서의 사용은 아직 미비하며 거의 노반재로 사용되고 있다. 그밖에 연구에서는 폐콘크리트에서 골재를 분리하는 과정 가운데 발생하는 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 하지만, 이 또한 실험적 연구 수준에 미치고 있으며 폐콘크리트 미분말은 건설폐기물과 같이 발생하는 시기와 장소에 따라 균질하지 못한 품질을 지니기 때문에 이를 활용한 고성능·고품질의 확보 등이 어려운 실정이다. 이에 국내 건설폐기물의 리사이클에 관한 연구에서는 더욱더 고성능·고품질의 실현을 위한 실질적으로 만족할 수 있는 기술개발의 정립이 절실히 요구되고 있다.

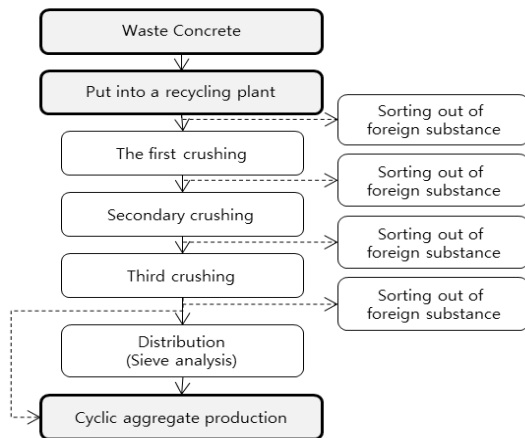


Fig. 4. Current Status of waste generation

2.3 국내 건설폐기물에 의한 환경영향

우리나라는 OECD 국가 가운데 온실가스 배출 증가율이 가장 높은 수준에 달해있으며, 에너지 원단위 및 CO₂(이산화탄소)배출 원단위도 선진국에 비해 높은 수준을 나타내고 있다. 환경부·한국환경공단의 건설폐기물 재활용통계 조사보고서에 따르면 우리나라는 연간 3억톤의 콘크리트가 제조되어 새로운 건설재료로 사용되고 있으며, 연간 약 4천만톤 이상의 폐콘크리트가 발생된다고 한다. 이러한 폐콘크리트를 처리하는 과정에서 발생하는 CO₂배출로 인한 환경오염에 대비해야한다. 다음 Table 2는 건설폐기물 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 폐콘크리트의 국가 LCI 데이터베이스(한국환경산업기술원)에 의한 폐콘크리트 처리방법별 CO₂ 배출량을 나타내며 폐콘크리트를 기존 매립하여 처리하는 방법보다 재활용하는 것이 CO₂의 배출계수가 대략 5배 이상 절감된다는 것을 볼 수 있다(www.edp.or.kr).

Table 2. CO₂ emissions by waste concrete processing method

Classification	Method	Emission factor	Unit
Waste concrete	Reclamation	7.00E-03	kg CO ₂ /kg
	Recycling	1.38E-03	kg CO ₂ /kg

한편, 시멘트 산업은 1900년대 최초 시멘트 공장이 설립된 이후 국가 경제발전에 부흥하며 주택건설 등이 활발히 이루어져 그 수요가 급증함과 동시에 비약적인 발전을 이루었다. 또한, 최근에 이르러서는 폐기물을 재이용하는 등의 친환경 산업으로 변모하고 있는데 석회석 채광 및 골재 채취 등 원자재의 제조부터 콘크리트 제조까지 발생하는 CO₂의 양을 100%로 가정하였을 때 각 공정 가운데 발생하는 CO₂의 비율은 다음 Fig. 5와 같다.

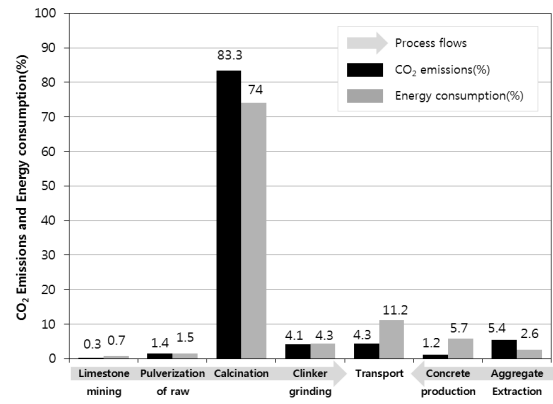


Fig. 5. CO₂ emissions and Energy consumption rate in the manufacture of concrete

Table 4. Investigation of the chemical composition of inorganic construction waste though the existing literature discussion
(Unit: weight percentage, %)

No	Construction waste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	L.O.I*	Total
1	Waste tile	61.40	17.43	1.73	8.80	1.13	0.68	1.27	-	0.36	6.61	99.41
2	Waste glass	71.00	1.47	0.07	8.91	4.04	13.10	0.83	0.24	-	-	99.66
3	Waste brick	64.34	24.10	4.81	0.57	1.13	0.78	2.89	-	1.09	-	99.71
4	Waste ALC	48.30	3.69	1.88	28.10	1.59	0.26	0.62	1.66	-	13.30	99.40
5	Waste gypsum board	1.60	0.69	0.22	54.32	0.1	0.46	0.23	41.47	0.49	-	99.58
6	Waste concrete powder	45.50	11.90	1.90	29.80	1.90	-	3.00	1.40	-	2.30	97.70

*L.O.I: Loss on ignition

시멘트 제조 과정 가운데 CO₂배출량은 시멘트의 클링커 소성 공정에서 대략 83%로 가장 높게 나타나고 있으며, 다음으로 골재 채취, 운송, 클링커 분쇄, 원재료의 분쇄, 콘크리트 생산, 석회석채취 순으로 높게 나타났다. 한편, CO₂는 시멘트 소성 중 약 900°C에서 석회석의 주성분인 탄산칼슘(CaCO₃)이 아래 식 (1)의 탈탄산화 반응에 의한 화학반응식에 의해 산화칼슘(CaO)이 분해되면서 그 발생이 이루어진다.



3. 무기계 건설폐기물의 분석

3.1 선행연구의 건설폐기물 화학성분 분석

시멘트는 석회질과 점토질원료로 미분쇄 혼합된 무기물질의 혼합분말로서 물과 결합하면 화학반응을 일으켜 경화하는 건설산업의 필수 건설 재료이다. 이 때 화학반응을 수화반응(hydration)이라 하며, 물에 의해 경화하는 현상을 수경성(hydraulic)이라고 말한다. 포틀랜드 시멘트의 대표적인 화학성분은 아래 Table 3과 같이 산화칼슘(CaO) 이산화규소(SiO₂), 산화알루미늄(Al₂O₃), 산화제이철(Fe₂O₃) 순으로 구성되어 이루어져있다.

Table 3. The average chemical composition of portland cement
(Unit: weight percentage, %)

Portland	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
I	63.8	22.1	5.0	3.0
II	63.6	23.3	3.9	3.9
III	64.9	20.8	4.5	2.8
IV	63.0	25.9	3.0	2.8
V	65.0	22.4	3.4	4.4

본 연구에서는 먼저 다양한 무기계 건설폐기물이 시멘트의 대표적인 화학성분과 유사하게 조성하고 있음을 착안하여 국내 기존 문헌고찰을 통해 건설폐기물을 중심으로 페타일, 폐석고보드 등 6종의 무기계 건설폐기물에 대한 화학성분표를 Table 4와 같이 수집하였다(Kwon 2006; Lee 2013; Seo 2013; Lee 2014; Oh 2002; Kang 2003). 수집된 무기계 건설폐기물의 화학성분을 살펴보면 폐석고보드의 경우 SiO₂의 함량이 적고 시멘트에서 가장 많은 비율을 차지하고 있는 CaO을 다량함유하고 있어 석회석(천연)의 대체 재료로서 가장 유용하게 이용될 것으로 예상되었다. 또한, 시멘트의 두 번째로 가장 많은 비율을 차지하는 SiO₂에 대한 대체 재료로는 페타일, 폐유리 및 폐점토벽돌이 예상되었으며, 폐경량 기포콘크리트와 폐콘크리트 미분말은 SiO₂뿐만 아니라 CaO성분도 적절한 비율을 차지하고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만, 시멘트 제조에 있어 석회질과 점토질의 원재료를 대체하기엔 불순물들이 다수 포함되어있다는 점이 단점이며, 이에 100% 순수 건설폐기물로는 시멘트제조에 한계가 있는 것으로 분석되었다.

3.2 화학적 인자에 관한 이론적 고찰

다양한 무기계 건설폐기물을 이용하여 고부가가치의 재생시멘트를 개발하기 위해서는 먼저 시멘트 제조에 관한 여러 화학적 인자들에 대한 고찰이 우선시 되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 시멘트를 이루는 대표적인 4가지 화학성분들은 킬른(Kiln)에서 대략 1450°C라는 높은 온도에서 화학적 결합에 의한 단단한 새로운 광물이 조성된다. 이 때 생성되는 새로운 광물은 C₃S(3CaO·SiO₂), β-C₂S(2CaO·SiO₂), C₃A(3CaO·Al₂O₃), C₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)로 표기되며 각각에 대한 명칭은 알라이트(Alite), 벨라이트(Belite), 알루미늄네이트(Aluminate), 페라이트(Ferrite)라 칭한다. 본 연구는 이론적 배합에 관한 연구로서 다음과 같은 여러 화학적 인자들에 대해 먼저 고찰하였다.

3.2.1 보그(Bogue)식

시멘트의 제조과정에서 시멘트의 원재료들을 조합하고 추 후 소성로(1450°C)에서 소성 과정을 거치면 새로운 단단한 광물이 생성되는데 이 때 생성되는 클링커(clinker) 광물에 대한 화합물의 예측은 주로 보그(Bogue)식을 이용한다. 이 보그식은 1920년대에 로버트 보그(Robert Herman Bogue)에 의해 고안된 식으로 국내뿐만 아니라 해외에서도 시멘트에 관한 광물조성분 예측 식으로 널리 사용하고 있다. 특히 국내 시멘트 관련 KS L 5201에는 이러한 보그식과 관련한 내용과 기준이 명시되어있다. 기준에 따르면 시멘트의 화학성분 가운데 산화알루미늄(Al_2O_3)과 산화제이철(Fe_2O_3)의 함량비($Al_2O_3(\%)/Fe_2O_3(\%)$)에 따라 다음 Table 5과 같이 계산되어 예측된다.

Table 5. Bogue formula

Content ratio	Prediction formula
$Al_2O_3 / Fe_2O_3 > 0.64$	$C_3S = [4.071 \times CaO(\%) - [7.600 \times SiO_2(\%) - [6.718 \times Al_2O_3(\%) - [1.430 \times Fe_2O_3(\%) - [2.852 \times SO_3(\%)]]]]]$
	$C_2S = [2.867 \times SiO_2(\%) - [0.7544 \times C_3S(\%)]]]$
	$C_3A = [2.650 \times Al_2O_3(\%) - [1.692 \times Fe_2O_3(\%)]]]$
$Al_2O_3 / Fe_2O_3 < 0.64$	$C_3S = [4.071 \times CaO(\%) - [7.600 \times SiO_2(\%) - [4.479 \times Al_2O_3(\%) - [2.859 \times Fe_2O_3(\%) - [2.852 \times SO_3(\%)]]]]]$
	$C_2S = [2.867 \times SiO_2(\%) - [0.7544 \times C_3S(\%)]]]$
	$C_4AF = [2.100 \times Al_2O_3(\%) - [1.702 \times Fe_2O_3(\%)]]]$

보그(Bogue)식에 의해 계산되는 시멘트 내 각 광물의 전형적인 수치는 대략 C_3S (규산3석회)가 55%, C_2S (규산2석회)가 10%, C_3A (알루미늄산3석회)가 10%, C_4AF (알루미늄산철4석회)가 10%로 구성되어 있다. 한편, 미국시험재료학회의 ASTM(American Society for Testing and Materials) 규격은 아래 Table 6과 같이 각 광물에 대한 평균값을 명시하고 있다. 하지만, 국내 KS 규격에는 이와 관련하여 각 수치에 대한 명확히 명시되어있는 기준이 없으며, 각 시멘트 제조사마다 그 기준이 있어 조금씩 차이가 있다. 본 연구에서는 상기 Table 7과 같이 국내 한 시멘트 제조업체로부터 그 기준 값을 입수하여 설정하였다.

Table 6. The proportion of cement minerals of ASTM standard (Unit: weight percentage, %)

Portland	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	50	25	12	8
II	45	30	7	12
III	60	15	10	8
IV	25	50	5	12
V	40	40	4	10

Table 7. Standards of cement manufacture in Korea

(Unit: weight percentage, %)

Portland	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	52	24	9	9
II	47	32	4	11
III	62	14	9	8

3.2.2 그 밖의 예측식과 화학적 인자

그 밖에 시멘트 및 재생시멘트 제조에 있어서 클링커 제조 관리를 위한 특성치로는 석회포화도(LSF: Lime Saturation Factor), 규산률(SM: Silica Modulus), 철률(IM: Iron Modulus)을 추가적으로 고려하여야하며 그 식은 다음 Table 8과 같다.

Table 8. Factors for the cement manufacturing control

	LSF	SM	IM
Formula	$\frac{1.00 CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
Range	0.92~0.96	2.3~2.8	1.6~2.0

석회포화도(LSF)는 클링커의 정상적인 소성 및 냉각시 산성성분인 이산화규소(SiO_2), 산화알루미늄(Al_2O_3), 산화제이철(Fe_2O_3) 성분들과 결합 가능한 최대 산화칼슘(CaO)량으로 표시된다. 또한 클링커 소성도의 가능으로서 미반응 CaO 즉, 유리석회의 양이 사용되는데 유리석회의 양이 적으면 소성반응이 그만큼 잘 진행된 것으로 예상할 수 있으며 석회 포화도가 낮을 경우 킬른(Kiln)내에서 소성은 잘 이루어지나 C_3S 의 감소로 초기강도가 감소되는 우려가 있을 수 있다. 반대로, 석회포화도가 높을 시에는 소성온도를 높이거나 소성시간을 길게 하더라도 소성이 어렵고 항상 유리석회가 남을 수 있다. 하지만, C_3S 증가로 인해 초기강도가 증가하는 부분이 있으며, C_3S 량이 많은 시멘트를 제조하기 위해서는 LSF가 높아야 된다. 석회포화도의 적정 계수범위로는 0.92~0.96이며, 좋은 품질의 클링커내 유리 석회량은 1.0~1.5%이다.

규산률(SM)은 클링커를 소성하는 로터리킬른(Rotary Kiln)내의 혼합물 거동과 클링커 품질에 영향을 미치는 중요한 수치이다. 규산률이 높아지면 원료혼합물의 소성이 어려워지기 때문에 덩어리 형성이 충분히 이루어지지 않으며, 킬른(Kiln) 중에 가루 상태로 날아다니고 만다. 또한, 소성반응 진행도 어려워져 그만큼 소성과정에서 고온의 열이 필요하게 되고 동시에 연료소비가 증가하게 되며 안정된 품질의 시멘트 제조가 어렵다. 마지막으로 킬른의 내화물을 침식시키고 소성되는 시멘트는 C_2S 가 많기 때문에 강도발

Table 9. Chemical composition analysis using XRF of inorganic construction waste

(Unit: weight percentage, %)

No	Construction waste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	etc.	L.O.I*	Total
1	Waste ceiling material	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.00
2	Waste gypsum board	0.91	0.32	0.30	36.42	0.22	0.30	0.12	39.29	0.03	0.13	21.96	100.00
3	Waste cement block	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.00
4	Waste concrete powder	55.46	10.28	3.42	22.35	1.16	0.92	3.77	1.20	0.37	0.71	0.37	100.00
5	Waste tile	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.00
6	Waste brick	63.05	21.00	5.80	2.13	0.71	1.33	3.49	0.02	0.74	0.50	1.24	100.00
7	Electric furnace slag	16.19	11.22	36.32	23.10	2.71	0.00	0.07	0.21	0.84	9.36	0.00	100.01
8	Limestone	12.21	2.40	0.77	44.75	2.15	0.01	0.64	0.00	0.00	0.00	36.55	99.48

*L.O.I: Loss on ignition

현이 늦어진다. 규산물의 적정한 계수 범위는 2.3~2.80이다.

철물(IM)은 산화알루미늄(Al₂O₃)과 산화제이철(Fe₂O₃)의 양적인 관계를 표시하는 비율로서, 철물이 낮은 원료혼합물은 낮은 소성온도에도 클링커의 생성이 용이하게 된다. 또한, 철물이 낮으면 시멘트의 C₃A가 작고 C₄AF가 많아져 초기강도가 낮아지지만 수화열이 작고 화학저항성이 크게 된다. 반대로 철물이 높은 원료혼합물은 소성이 어려워지기 때문에 규산물이 높을 때와 같이 연료소비비가 증가하게 되며, 단단한 경질의 클링커가 생성되어 클링커를 분쇄시 많은 에너지가 소모되어 생산원가가 높아지는 결과를 가져오게 된다. 이러한 철물의 적절한 범위는 1.6~2.00이다.

석회포화도, 규산물, 철물 이외에 원료에 포함하고 있는 산화마그네슘(MgO)은 용액(고체가 녹아서 액체가 되는 현상)량을 늘리거나 용액형성 온도를 낮추게 됨으로 소성반응을 촉진한다. 그러나 그 함유량이 너무 많으면, 콘크리트가 경화할 시 수화팽창을 일으킴으로서 국내 KS규격에서는 5%이하를 상한치로 하고 있다.

3.3 무기계 건설폐기물의 수집 및 화학성분 분석

본 연구에서는 앞서 기존문헌고찰을 통해 선행연구 되었던 무기계 건설폐기물의 화학성분을 분석하고 이를 토대로 실제 건설현장과 중간처리, 최종처리 및 재활용 업체를 방문하여 페타일, 폐천장재, 폐시멘트블럭 등 총 6종의 건설폐기물을 수집하였다. 또한, 순수 무기계 건설폐기물로는 재생시멘트의 제조에 있어 그 한계가 있을 것으로 판단되어 시멘트 제조회사와 산업부산물 취급장으로부터 석회석과 전기로슬래그를 입수하였다. 수집된 각 무기계 건설폐기물은 화학성분을 분석할 수 있는 XRF 장비를 통해 화학성분을 분석하였으며, 그 결과는 상기 Table 9와 같다.

본 연구에서 분석된 무기계 건설폐기물의 화학성분은 선행연구에 의해 수집된 건설폐기물과 유사한 화학성분들로 조성 되어있어

크게 차이가 없는 것으로 분석되었다. 폐천장재와 폐석고보드의 경우 기존 선행연구된 것과 같이 시멘트 제조에 있어 산화칼슘(CaO)을 대체하는데 주요한 대체원이 될 것으로 예상되며 페타일, 폐점토벽돌 역시 규산질의 원료를 대체하는데 주요하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 폐시멘트와 폐콘크리트 미분말은 산화칼슘(CaO)성분을 포함하지만 그 양이 소량이며, 이산화규소(SiO₂)의 비율이 많은 것으로 보아 모래성분이 다량 함유 되어있어 성분 조절 대체재로 소량 활용될 것으로 예상되었다.

Table 10. The combination of inorganic construction waste

(Unit: weight percentage, %)

No.	Construction waste	Combination I	Combination II	Combination III
1	Waste tile	4.1	4.4	4.8
2	Waste cement block	0.7	0.5	0.3
3	Waste ceiling material	17.5	12.4	7.2
4	Limestone	75.0	80.0	85
5	Electric furnace slag	2.7	2.7	2.7
Total		100.0	100.0	100.0

3.4 무기계 건설폐기물의 이론식 조합 및 분석

본 연구에서는 시멘트의 강도와 밀접한 관계가 있으며 규산칼슘화합물인 C₃S(규산3석회)와 C₂S(규산2석회)를 생성하는데 가장 주요하게 작용하는 물질로서 산화칼슘(CaO)과 이산화규소(SiO₂)를 중심으로 무기계 건설폐기물을 아퍼 Table 10과 같이 조합하였다. 이론식 조합은 무기계 건설폐기물을 이용한 환경부하 저감형 재생시멘트 개발이라는 본 연구의 목적에 부합하여 탈탄산화반응

Table 11. The result of clinker component analysis using bogue formula

(Unit: weight percentage, %)

Classification	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	LSF	SM	IM
Standard	52.00	24.00	9.00	9.00	0.91	2.70	1.70
Combination I	48.38	20.15	7.15	14.14	0.99	2.72	1.61
Combination II	50.23	20.82	7.61	14.49	0.97	2.76	1.67
Combination III	51.27	22.34	8.12	14.90	0.94	2.79	1.74

에 의해 발생하는 이산화탄소(CO₂)의 양을 줄이고자 탄산칼슘(CaCO₃)을 다량 함유하고 있는 석회석의 양을 이론적으로 어느 정도까지 줄일 수 있는가를 기준으로 석회석의 비율을 75, 80, 85%에 맞추어 조합하였다. 폐천장재와 폐석고보드는 앞서 언급한 바와 같이 석회석(천연자원)과 비교했을 때 동등 수준의 CaO을 포함하고 있다. 하지만, 삼산화황(SO₃) 성분이 다른 무기계 건설폐기물에 비해 다량 함유되어있어 보그(Bogue)식에 의한 광물조성 성분을 예측할 시 변수로 적용되어 예상보다 석회석을 대체하는데 많은 양이 고려되지 못하였다. 또한, 폐시멘트 불력과 폐콘크리트 미분말 역시 선행연구에서와 같이 소량의 CaO을 포함하고 있지만, 보다 많은 SiO₂를 포함하고 있어 이론식 배합에 있어서는 크게 적용되지 못하였다. 규산질 원료에 있어 크게 적용될 것으로 예상되는 페타일과 폐점토벽돌은 상대적으로 CaO이 더 많고 SiO₂가 적은 페타일이 적합한 것으로 판단되어 조합하였다. 한편, 주요 4가지 광물(C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF)만을 놓고 예측할 시에는 산업부산물인 전기로 슬래그를 제외해도 문제가 없었지만 시멘트 제조관리에 있어 적용되는 석회포화도(LSF), 규산률(SM), 철률(IM)을 고려하면 그 수치들이 적정범위에서 높게 예상되어 이들을 낮추기 위해서는 성분조절재로서 산화제이철(Fe₂O₃)을 다량 함유하고 있는 전기로슬래그의 포함을 고려해야 한다. 이에 분석한 결과 혼합비에 약 2.7% 첨가했을 시 그 수치들이 안정화되는 것으로 보여 각 조합별 고정 값으로 함께 조합하였다.

4. 클링커 소성의 예측분석 결과

4.1 보그(Bogue)식에 의한 클링커 광물 분석

본 연구에서는 국내 시멘트 업체에서 준수하는 1종(보통)포틀랜드시멘트의 광물조성 값을 기준으로 앞서 무기계 건설폐기물을 조합하였으며, 조합한 혼합비율을 활용하여 실제 소성 이후 생산되는 클링커의 광물조성비를 보그(Bogue)식에 대입해 상기 Table 11과 같이 예측 및 분석하였다.

아래 Fig. 6은 앞서 예측 된 결과를 나타낸 것으로 초기강도에

있어 큰 역할을 하는 C₃S에 대해서는 조합 3(51.27%)이 가장 근접한 값으로 예측 되었으며 이를 제외하고 두 조합(조합1: 48.38%, 조합2: 50.23%) 모두 기준 값(52%)에 조금 미치지 못하였다. 초기 강도 보다는 장기강도 발현에 크게 기여하고 반응속가 낮으며 발열량이 낮은 C₂S의 경우 세 조합(조합1: 20.15%, 조합2: 20.82%, 조합3: 22.34%) 모두 기준에 도달하지 못하였다. 또한, 화합물에 있어 반응속도가 빠르고 발열량이 매우 높은 C₃A도 세 조합(조합1: 7.15%, 조합2: 7.61%, 조합3: 8.12%) 모두 기준 값을 만족하지 못하였다. 하지만, C₄AF는 반대로 기준보다 높은 수치로 예측되었다. 석회포화도(LSF)와 철률(IM)에 있어서는 조합3(LSF: 0.94, IM: 1.74)이 세 조합 가운데 기준 값에 가장 근접한 값으로 예측되었으며, 반대로 규산률(SM)은 조합1 (SM : 2.7)이 가장 근접하게 예측 되었다. 분석결과, 전체적으로 조합 3이 초기강도와 장기강도 발현에 영향을 미치는 C₃S와 C₂S가 가장 많이 예측 및 분석되어 기준으로 하는 1종 시멘트에 가장 이상적인 조합으로 분석 되었으며, 그 다음으로는 조합 2와 조합 1순으로 분석 되었다.

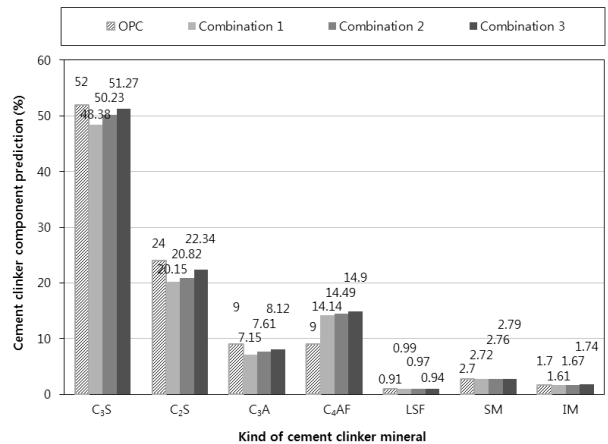


Fig 6. Graph of clinker mineral component prediction result

4.2 광물조성 예측 결과값에 대한 분석 및 고찰

보그(Bogue)식을 통하여 실제 소성 후 생산되는 클링커의 광물

조성비를 예측 분석한 결과, 시멘트의 원재료인 석회석의 비율을 85% 이상 함께 사용하지 않는다면 이론상 국내 시멘트 업체에서 기준으로 하는 광물조성 값에 도달하지 못하는 것으로 분석되었다. 즉, 배합에 있어 만족하는 C_3S 와 C_2S 등의 값을 얻기 위해서는 산화칼슘(CaO)을 다소 포함하고 있는 무기계 건설폐기물이나 천연자원인 석회석의 비율을 높여야 할 것으로 보인다.

본 연구에서는 석회석의 대체재로 폐천장재와 폐석고보드를 선정하였으나 앞서 우려했던 바와 같이 석회석과 비교했을 때 동등 수준의 CaO 을 함유하고 있음에도 불구하고 삼산화황(SO_3)이 다량 포함되어 있어 보그(Bogue)식의 C_3S 를 예측하는 공식에서 얻고자 하는 예측값을 충분히 얻지 못하였다. 이는 추후 재생시멘트 제조에 있어 SO_3 에 대해 조금 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료되며 이를 제거하고 폐기물내 CaO 의 비율을 높일 수 있다면 폐천장재와 폐석고보드는 재생시멘트를 개발하는데 있어 크게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

4.3 재생시멘트 개발의 기대효과

이론적 배합을 통한 재생시멘트 개발의 연구 분석한 결과, 대체적으로 무기계 건설폐기물은 선행연구에서 연구된 바와 같이 시멘트의 주요 화학성분들을 함유하고 있어 시멘트 제조에 있어 시멘트의 원재료를 대체하는데 그 가능성을 확인 할 수 있었다. 하지만, 각 무기계 건설폐기물은 발생하는 장소와 시기 그리고 제조방법에 따라 다르기 때문에 함유하는 화학성분들이 일정치 못하며 불순물들이 다량 함유되어있음을 볼 수 있다. 실제 재생시멘트 제조 과정에서 이러한 불순물들은 균질한 품질의 제품생산을 방해 할 뿐만 아니라 품질 관리에 있어서도 어려움의 원인이 될 것이다. 이를 위해 건설폐기물이 반출되는 건설현장에서부터 수집 및 운반에 이르기까지 해당 처리 업체를 잘 관리할 수 있는 매뉴얼 개발 및 인센티브제도 도입 등을 실시하여 실질적으로 건설폐기물의 상성별 분리배출이 잘 이루어질 수 있도록 하는 제도개선이 이루어져야 할 것이다. 건설폐기물이 잘 분류되어 수집이 용이하게 된다면 조금 더 예측 가능하며 균질한 시멘트 대체 자원 확보가 가능할 것으로 기대되며, 이를 활용한 기술 개발이 확보 된다면 재생시멘트 개발 뿐만 아니라 건설재료 산업에서의 다양한 제 2차 건설제품의 개발 또한 가능할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 다양한 무기계 건설폐기물을 이용하여 환경부하 저

감형 재생시멘트 개발의 이론적 배합에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존문헌 고찰을 통해 선행 연구되었던 무기계 건설폐기물에 대한 화학성분과 본 연구에서 수집한 무기계 건설폐기물의 화학성분은 비슷한 양상의 성분들로 이루어져 있음을 확인하였다.
2. 1종(보통)포틀랜드 시멘트를 기준으로 수집된 무기계 건설폐기물의 화학성분을 이용하여 보그(Bogue)식에 대입 및 클링커 소성 이후 발생하는 광물을 예측한 결과 석회석 85%이상 조합에서 동등 수준의 시멘트 개발이 가능한 것으로 분석되었다.
3. 석회석의 대체재로 폐천장재와 폐석고보드의 경우 다량 함유하고 있는 삼산화황(SO_3)의 제거가 가능하다면 재생시멘트 개발에 있어 주요한 대체 재료로서 사용될 수 있을 것으로 분석되었다.
4. 무기계 건설폐기물은 대부분 이산화규소(SiO_2)를 다량 함유하고 있어 1종(보통)포틀랜드 시멘트 이외 다양한 시멘트 개발도 가능할 것으로 사료된다.

이상과 같은 결과, 무기계 건설폐기물은 시멘트의 주요화학성분을 함유하고 있으며 1종(보통)포틀랜드 시멘트의 화학성분을 기준으로 보그(Bogue)식을 이용하여 조합한다면 이론적으로 재생시멘트의 개발이 가능한 것으로 분석되었다. 하지만, 본 연구는 이론적 연구 결과로서 그 한계가 있으며, 본 연구를 기초로 추후 실험적 연구가 진행되어 화학적 및 물리적 연구가 동시에 이루어져 추가적인 연구가 진행되어야 무기계 건설폐기물을 이용한 재생시멘트 등 건설재료 산업의 제 2차 건설제품 개발이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다.

References

Competitiveness strengthening plan and medium and long-term demand forecast of the cement industry. (2009). Korea Ceramic Institute [in Korean].

Kang, T.H., Jung, M.S., Ahn, J.C., Kang, B.H. (2003). Recovering hydration performance of cementitious powder by concrete

- waste according to burning temperature, The Korea Institute of Building Construction, **3(1)**, 81–87 [in Korean].
- Kim, J.H., Tae, S.H. (2016). Theoretical study on the development of environmental load reducing recycled cement utilizing inorganic construction wastes, Architectural institute of Korea, **36(1)**, 365–366 [in Korean].
- Korea LCI Database information network, Korea Environmental Industry & Technology Institute, www.edp.or.kr [in Korean].
- KS L 5201. (2016). Portland Cement, Korean Agency for Technology and Standards [in Korean].
- Kwon, H.W. (2006). (An) Experimental study on the use of waste ceramic tile as pozzolanic admixture of concrete, Pusan University [in Korean].
- Lee, J.S., Yoo, H.M., Yang, W.S., Park, J.K., Jo, S.J., Kim, B.S., Seo, Y.C. (2013). A study on clay brick manufacturing with powders of CRT glass waste, Journal of Korea Society of Waste Management, **30(1)**, 86–93 [in Korean].
- Lee, Y.J., Lee, S.S. (2014). The physical and reaction properties of on the blast furnace slag based non-cement matrix according to SO₃ content and type of gypsum, Hanbat University [in Korean].
- Nationwide waste statistical survey report. (2013). Ministry of Environment [in Korean].
- Oh, D.Y., Noguchi, T., Kitagaki, R., Park, W.J. (2014). CO₂ emission reduction by reuse of building material waste in the Japanese cement industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **38**, 796–810.
- Oh, S.G. (2002). A study for the hydration recovery of recycle cement using waste concrete powder, Journal of the Architectural Institute of KOREA Structure & Construction, Dong eui University, **18(10)**, 53–60 [in Korean].
- Recycling basic plan of construction waste. (2011). Ministry of Environment [in Korean].
- Seo, S.K., Park, S.H., Chu, Y.S., Son, H., Lee, J.K. (2013). Analysis of ALC material as adiabatic material, 2013 Spring Conference of Korea concrete institute, 61–62 [in Korean].
- Waste generation and processing status of the country. (2014). Ministry of Environment [in Korean].

무기계 건설폐기물을 이용한 재생시멘트 배합설계에 관한 이론적 제안

오늘날 시멘트 산업은 시멘트 제조시 발생하는 이산화탄소(CO₂)의 배출량을 줄이기 위해 각종 산업부산물을 연료의 대체재로 사용하거나 건설폐기물을 재활용한 콘크리트 제 2차 제품을 개발하는 등 환경부하 저감 산업으로 변모하기 위해 노력하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 발생하는 건설폐기물의 종류와 발생추이를 고찰함과 건설폐기물을 활용한 재생시멘트 개발에 관련된 선행연구를 분석함으로써 재활용 가능한 무기계 건설폐기물에 선정하고 수집하여 분석하였다. 수집된 무기계 건설폐기물의 각 화학성분은 XRF장비를 이용하여 분석하였으며, 국내 시판되는 시멘트의 화학성분을 기준으로 무기계 건설폐기물을 조합하여 보그(Bogue)식을 활용한 소성이후 생성되는 클링커(clinker)의 광물성분을 예측 분석하였다. 그 결과, 폐석고보드와 폐천장재가 다량의 산화칼슘(CaO)을 함유하고 있어 시멘트 제조시 중요하게 사용되는 석회석의 대체재로서 활용 가능한 것을 확인하였으며, 이러한 무기계 건설폐기물을 적절히 조합한다면 1종 이외에 다양한 포틀랜드 시멘트 개발도 가능할 것으로 사료된다. 본 연구는 실험적 연구에 앞서 이론적 배합에 관한 연구로 무기계 건설폐기물을 이용한 환경부하 저감형 재생시멘트 개발의 가능여부를 분석하고자 하였다.