

Review

Evaluation of Some Stone Dust and Sludge Generated in the Aggregate Production Process and Research Trends for Its Use

Jin-Young Lee, Young-Wook Cheong*, Sang-Woo Ji, Dong-Gil Lee

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author : ywc@kigam.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 27 September 2021

Received in revised form 25 October 2021

Manuscript accepted 25 October 2021

Available online 29 October 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.5.605>

ABSTRACT

When crushing rocks to produce aggregates, solid stone dust or sludge is generated as a by-product. These by-products are classified as waste and are not utilized, and most of them are disposed of landfills. This by-product differs in mineral composition, chemical composition, and physical properties depending on the rock type and aggregate production process. Therefore, if a technology that can make good use of the inherent physical or chemical properties of by-products is developed, economic and environmental benefits can be achieved instead of disposal. In this study, stone dust and sludge were collected from domestic aggregate producers and physical and chemical properties were investigated by performing XRD mineral analysis, particle size analysis, and chemical analysis. In addition, the research trend was identified through a domestic and international research case studies on the use of stone powder and sludge.

Keywords : aggregates, rock dust, sludge, waste

Citation: Lee, J.-Y., Cheong, Y.-W., Ji, S.-W., Lee, D.-G. (2021) Evaluation of Some Stone Dust and Sludge Generated in the Aggregate Production Process and Research Trends for Its Use. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.605-613, doi:10.9719/EEG2021.54.5.605.

해설

골재 생산과정에서 발생하는 일부 석분의 평가와 그 활용 연구 동향

이진영 · 정영욱* · 지상우 · 이동길

한국지질자원연구원

*책임저자 : ywc@kigam.re.kr

요 약

암석을 파쇄해서 골재를 생산할 때 부산물로서 암분을 위주로 한 고상 석분 혹은 슬러지가 발생한다. 이러한 부산물은 폐기물로 분류되어 활용되지 못하고 대부분 매립 처분되고 있다. 이 부산물은 원석의 종류와 생산 과정에 따라서 광물조성, 화학조성 및 물성 등이 다르다. 따라서 부산물의 물리적 혹은 화학적 특성을 잘 활용할 수 있는 기술이 개발된다면 폐기 처분 대신 경제적 및 환경적 이익을 거둘 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내 골재 생산업체로부터 석분 슬러지를 수집하여 XRD 광물 분석, 입도분석 그리고 주성분 화학 분석을 수행하여 물리적 화학적 특성을 조사하였다. 또한 국내외적으로 진행된 고상 석분 및 슬러지의 활용사례를 통해서 연구 동향을 파악하고 향후 연구 분야 도출에 기초 자료로 활용토록 하였다.

주요어 : 골재, 석분, 슬러지, 폐기물

1. 서 론

콘크리트나 모르타르를 만드는데 필수적인 재료중 하나가 골재이다. 골재를 생산할 때 파쇄 및 선별 공정을 거치며 골재 표면에 불순물이 부착될 수 있다. 불순물로서 먼지, 점토덩어리, 유기물, 화학염류 등을 들 수 있으며 골재의 부착력이나 시멘트의 수화작용을 저해할 수 있으므로 골재 생산시 세척 공정을 배치한다(Lampris et al., 2009, Park, 2020). 세척시 사용한 물을 처리하기 위해서 보통 폐수처리시설을 운영한다. 세척수는 농축조 탱크로 보내지며 오니는 필터 프레스로 압착되어 탈수 케이크(슬러지)가 발생한다. 골재산업에서 발생하는 석분 또는 석분토는 폐기물 관리법에서 무기성 공정오니로 취급되어 85% 이하로 탈수되어 매립 처리를 원칙으로 한다(환경부 자원순환국 규정). 시설 규모 및 원석 처리 양이 증가할수록 석분 슬러지의 발생량도 커지며 따라서 큰 야적공간이 필요하고 매립 비용이 상승한다(Lampris et al., 2009). 따라서 골재 생산공정에서 폐수처리는 공정 규모나 처리량에 따라서 단순한 침사조부터 농축조와 필터프레스 공정 등 다양한 방식이 운영된다.

Park (2020)은 국내 석분슬러지는 원석 기준 3~5%, 부순 모래 생산량 기준 15~17% 가량 발생하며 2020년도 석분슬러지 발생량은 약 13백만^m로 추정했다. 지역적으로는 수도권, 경북, 경남, 충남, 전남, 충북, 강원, 전북 순으로 석분 슬러지가 발생하고 80%이상이 매립 처리되는 것으로 평가했다. 한편 폐기물 관리법에서는 슬러지

의 성토재로 재활용이 가능하나 농지법 규칙으로는 슬러지 사용이 불가하다. 또한 석분을 응집하는 과정에서 사용하는 응집제 성분이 토양 및 수질을 오염 시킬 수 있다는 주장 등이 제기되고 있다(Chungcheong review, 2019; Sisapress, 2021). 한편 골재 사업자들은 슬러지의 농경지 성토재 재활용재로 사용을 원하는 실정이다(KBIZ, 2018). 그러나 골재 생산업체는 자원화할 수 있는 연구 인프라와 관련 기술 축적이 미흡한 실정이다.

오늘날 다양한 기원의 폐기물과 산업 부산물을 안전하게 처리하는 것이 세계적으로 중요한 관심거리다. 산업 폐기물을 새로운 원재료로 활용하면 원료의 채굴 및 획득 단계에서 환경 훼손을 줄이고 폐기물 발생에 따른 환경 피해 감소 물론 폐기물 처리 비용을 상쇄할 수 있다는 점에서 그 의의가 크다(Kim, 2000, Yu, 2008). 예를 들면 Yu (2008)은 석탄재(토양 영양공급원, 토양 혼합제), 철강 슬래그(토양개량제, 비소오염토양 처리), 굴폐각(토양개량제, 수질 처리)의 활용성을 제시하였다. 석분 슬러지의 활용 연구 사례로 모르타르 제품의 원료, 중금속 흡착제, 산성토양의 개량제, 도자기 원료, 건축용 자재로서 인조석 판재, 벽돌 등 건자재 제품, 맨홀이나 하수도관 제조에의 활용 등 다양한 시도들이 있었다(Kim et al, 2006; Almeida et al., 2007). Almeida et al (2007)은 석분의 특성 예를 들어 광물학적 특성에 따라서 제지 산업, 도자기 산업, 농업, 수처리 및 쓰레기 매립장 차폐 등 광범위한 영역에 활용 가능할 것으로 예상하고 있다. Lampris et al., (2009)는 습식 골재 생산시 발생한 실트를 metakaolin

과 애쉬로 혼합하여 골재 제조를 수행했다. 이상의 연구 사례에서 국내외 적으로 많은 연구자들이 슬러지 처분 문제를 해결하고자 세멘트 모르타르, 골재 제조, 인공 석재, 토지 개량제, 수처리제, 중금속 흡착제 등 다양한 분야의 활용 연구를 수행해 오고 있다.

그러나 다양한 산업 전반에서 발생하는 산업 부산물의 재활용에 관한 연구가 전세계적으로 지속되는 시점에서 골재 생산 과정에서 발생하는 슬러지의 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 국내 골재 생산 과정에서 발생하는 석분 과 슬러지(케이크)를 수집하여 이들의 물리적, 광물학적 조성 및 화학조성을 조사하였다. 석분 및 슬러지의 국내외의 활용 연구 사례는 물론 유사한 폐기물의 활용 연구사례를 수집하여 연구 동향을 파악하였다. 이 연구 사례를 통해 향후 골재 부산물의 활용 연구 수행을 위한 기초 연구 자료로 활용토록 하였다.

2. 연구 방법

경기도, 인천, 충청남도, 충청북도, 전라남도 등 현장을 답사하여 골재 생산 주요 공정, 골재 생산품 그리고 폐기물의 발생과정을 조사하였다. 현장 답사가 진행된 곳은 주로 건식으로 골재를 생산하였고 일부는 습식으로 골재를 생산하였다. 골재 협회를 통해서 10개, 현장 조사 시 3개 케이크(탈수후 생성된 슬러지)를 수집했다. 기타 파분쇄 과정에서 발생하는 석분(모래~실트 석분, 미석분)도 8개를 수집했다.

시료들에 대하여 입도분석기(MAJ6140; Malvern Instruments)로 비표면적 및 입도를 분석했다. 무게 감량차로 함수율을 측정하였다. 시료의 화학 조성은 한국지질자원연구원

에 의뢰하여 분석하였고 X-선 형광분석기(Shimadzu, Japan)로 SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 항목을 분석하였다. 시료의 구성광물은 X선 회절분석기(X'Pert MPD, PHILIPS)로 감정되었다. 슬러지의 문헌조사 범위는 골재, 석재 및 순환골재의 슬러지 활용 사례를 위주로 했다.

3. 연구 결과

3.1. 골재 생산과 석분 및 석분 슬러지 발생 과정

현장 조사 결과 골재는 업체가 자체 석산을 운영해서 원석을 사용하던가 혹은 외부로부터 원석을 반입해서 골재를 생산한다. 원석은 크기 단계별로 파쇄과정과 선별 과정을 거친다. 선별과정은 건식과 습식으로 구분할 수

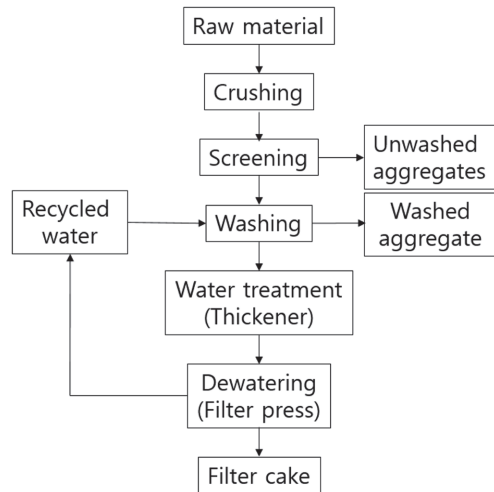


Fig. 1. Flow chart of wet aggregate production.

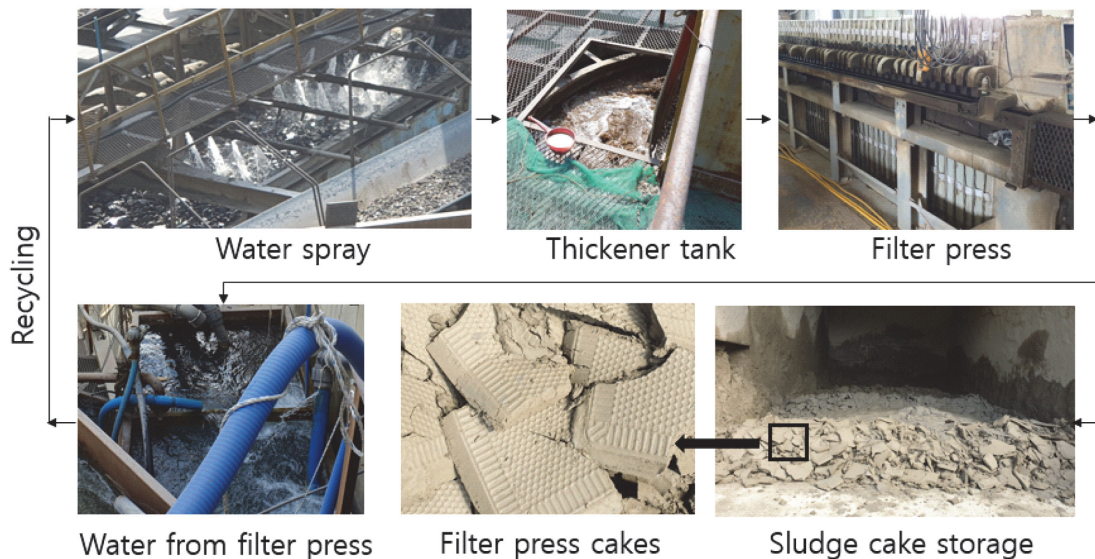


Fig. 2. Aggregate washing and screening process.

있다. 습식 선별 과정시 세척수를 분사하여 골재를 세척하며 이때 미세 석분을 포함한 탁수가 발생한다. 탁수중의 미립분은 빠르게 침강하지 않아서 폐수처리공정으로 보내서 석분을 농축 후 탈수하여 고체 슬러지인 케이크가 발생하고 청수가 배출된다(Fig. 1). 케이크는 현장에서 일정 기간 야적되며 폐기물 처리된다(Fig. 2). 탈수된 물은 다시 세척용수로 재사용한다.

3.2. 케이크 및 석분의 광물학적 및 물리적 특성

시료는 케이크(No.1~10, 11, 19, 21)와 석분(No.12~18, 20)으로 구분된다. 케이크는 습식 선별 과정에서 발생한 슬러지이며 석분은 건식 파분쇄 과정에서 발생한 모래 입도 이하의 물질이다. 후자는 판매하지 못하거나 조업 중단 등으로 현장에 방치된 시료들이다. XRD 광물 감정 결과를 Table 1에 수록하였고 일부 결과를 Fig. 3 표시하였다. 주요 구성 광물은 석영, 운모, 장석, 점토광물로 구성되어 있었다. 케이크 시료(No. 1 및 4)에는 몬트모릴로나이트나 카올리나이트 등 점토 광물이 포함된 것이 기타 시료와 비교되었다. 해사 슬러지(No. 15)의 경우 석영과 Albite 등으로 구성되어 타 시료에 비해서 광물조성이 단순했다(Fig. 3).

시료의 입도 분석 결과를 케이크와 석분 시료로 구분

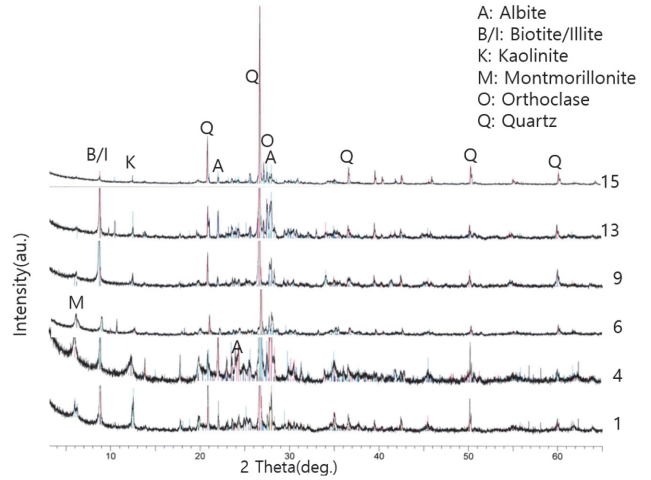


Fig. 3. X-ray diffraction data of samples. Numbers indicate sample ID. Sample ID is the same as in the Table 1.

해서 요약했다(Table 2). 케이크의 입자 분포는 시료간에 유사한 반면 석분의 입자 곡선은 상대적으로 차이가 발생했다(Fig. 4). 케이크의 평균 입자(Dx(50))는 26μm으로 석분에 비해서 작았고 비표면적은 컸다. 입자의 Dx(10)과 Dx(90)의 경우 4μm ~ 271μm 범위를 나타냈다. 일부 케이크(No. 7, 9)는 2000μm의 입자도 확인되었다(Fig. 4).

Table 1. XRD patterns of samples

Samples	Mineral composition	Type
1	Muscovite/Illite Quartz Albite Biotite Clinochlore Kaolinite Montmorillonite, Orthoclase, Calcite, Hornblende	Cake
2	Muscovite/Illite Biotite Quartz Albite Clinochlore Kaolinite Montmorillonite Orthoclase	Cake
3	Muscovite/Illite Quartz Albite Biotite Clinochlore Kaolinite Montmorillonite Orthoclase	Cake
4	Albite Orthoclase Clinochlore Kaolinite Biotite Montmorillonite Muscovite/Illite Quartz	Cake
5	Albite Orthoclase Clinochlore Kaolinite Biotite Montmorillonite Muscovite/Illite Quartz	Cake
6	Muscovite/Illite Quartz Albite Biotite Clinochlore Kaolinite Montmorillonite Orthoclase Calcite Hornblende	Cake
7	Muscovite/Illite Quartz Biotite Clinochlore Hornblende Albite Montmorillonite Orthoclase Calcite	Cake
8	Biotite Hornblende Clinochlore Calcite Albite Quartz Montmorillonite Dolomite Orthoclase	Cake
9	Biotite Quartz Albite Kaolinite Clinochlore Muscovite/Illite Montmorillonite Calcite	Cake
10	Muscovite/Illite Quartz Albite Biotite Clinochlore Kaolinite Montmorillonite Orthoclase Calcite Hornblende	Cake
11	Quartz Albite Microcline Biotite Kaolinite Muscovite/Illite Montmorillonite Calcite Hornblende Clinochlore	Cake
12	Quartz Albite Microcline Biotite Kaolinite Muscovite/Illite Montmorillonite Calcite Hornblende Clinochlore	Rock power
13	Albite Quartz Biotite Microcline Hornblende Muscovite/Illite Clinochlore	Rock power
14	Quartz Albite Microcline Biotite Hornblende Muscovite/Illite Clinochlore Calcite	Rock power
15	Quartz Albite Microcline Hornblende Clinochlore Muscovite/Illite	Rock power
16	Quartz Albite Microcline Clinochlore Muscovite	Rock power
17	Quartz Muscovite/Illite Clinochlore Albite Orthoclase Calcite	Rock power
18	Quartz Muscovite/Illite Clinochlore Albite Orthoclase Biotite Calcite	Rock power
19	Quartz Muscovite/Illite Albite Biotite Clinochlore Orthoclase Calcite	Cake
20	Quartz Albite Microcline Clinochlore Kaolinite Muscovite/Illite Montmorillonite Calcite	Cake
21	Quartz Biotite Albite Clinochlore Calcite Muscovite/Illite Montmorillonite Orthoclas	Rock power

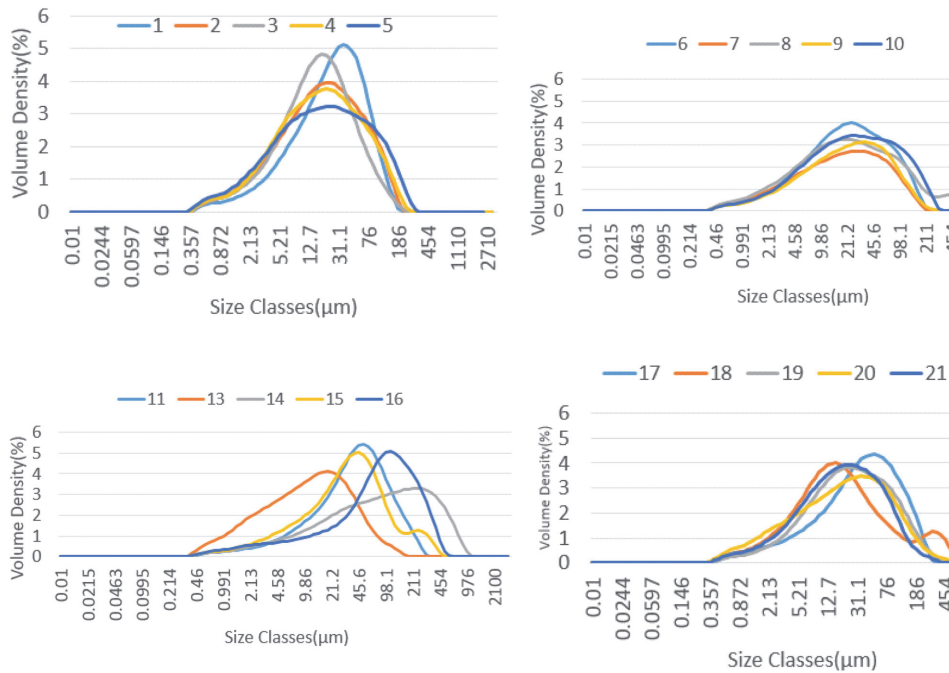


Fig. 4. Size distribution of particles in samples. Sample ID is the same as in the Table 1.

Table 2. Summary of particle size analysis

	Mean	Cake (n=13)	rock dust (n=7)
Specific Surface Area(m ² /kg)		701	695
Dx (10)(μm)		4	5
Dx (50)(μm)		26	44
Dx (90)(μm)		271	196

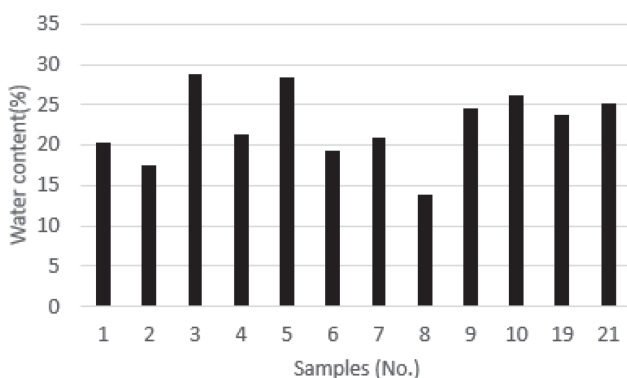


Fig. 5. Comparison of moisture content of Cakes.

과로 인한 2차 거대 입자가 만들어 지면서 생긴 결과일 수 있다(Pratiwi et al., 2020).

케이크의 함수율은 13.94%~28.83% 범위로 측정되었다 (Fig. 5). 케이크의 함수율은 탈수 직후 가장 높고 현장에 야적되면서 건조 과정에 따라서 물이 증발되어 감소한다.

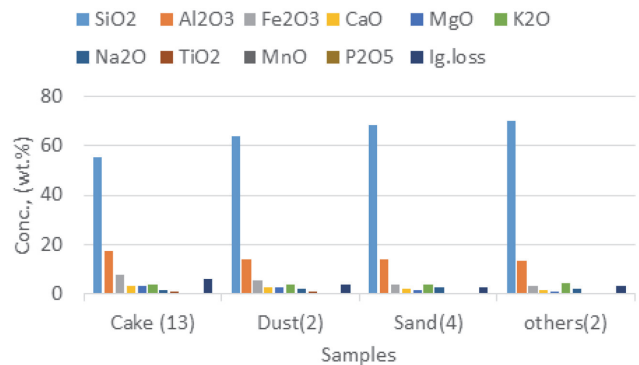


Fig. 6. Comparison of major elements by sample type.

각 현장마다 보관형태가 다르기 때문에 함수율의 범위가 컸다.

3.3. 케이크 및 석분의 화학적 조성

시료들에 대한 주성분 분석 결과를 Table 3에 수록했다. 케이크를 분석한 결과 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, LOI, K₂O, CaO, MgO, Na₂O, TiO₂, P₂O₅ 순(평균값)으로 함량이 높았다. 석분의 경우도 유사한 경향을 보였다(Fig. 6). 시료 구분 없이 공통적인 특징으로서 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O가 높았다. 현장 조사시 탐문한 결과에 의하면 골재 원석은 대부분은 화강암 및 편마암이 원석이었다. 암종에 따른 석분 슬러지의 화학조성 범위를 파악하기 위해서 기존 연구자료를 검토했다(Table 4). Karaca et al. (2012)

Table 3. Result of chemical analysis of the sample (Unit in wt. %)

Cake (n=13)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI
Mean	56.45	17.17	7.47	2.92	2.72	4.00	1.77	0.92	0.12	0.20	5.91
Min.	43.58	11.7	3.25	0.87	0.71	2.27	1	0.45	0.09	0.11	3.34
Max.	66.25	21.1	10.58	11.99	7.22	5.04	3.02	1.6	0.18	0.62	9.45
By-product (n=8)											
Mean	66.40	13.86	4.84	2.23	1.97	3.91	2.25	0.62	0.08	0.18	3.24
Min.	55.46	10.92	2.19	0.75	0.72	3.17	1.1	0.4	0.04	0.08	1.41
Max.	74.56	17.03	8.93	3.24	3.36	5.08	3.39	0.97	0.13	0.41	5.06

LOI = Loss on ignition

Table 4. Chemical composition of Dimension stone (unit in wt. %)

Stone type	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	LOI	Ref.
Granite/ Marble/ Limestone	0.18~ 85.50	4.90~ 83.22	0.2~ 21.90	0.05~ 36.8	0.40~ 9.64	<0.04~ 9.30	<0.06~ 3.75	-	0.01~ 1.80	0.2~ 43.21	Karaca at (2012)
Granite	71.65	1.83	14.25	2.86	0.86		4.43	-	-	-	Torees et al. (2004)
Limestone dust	0.26	56.19	0.25	0.3	0	-	0	-	0	42.56	Turgut, et al. (2007)
Basalt	51.44~ 53.75	8.42~	13.35~ 16.65	9.30~ 12.50	5.77~ 8.58	2.27~ 3.00	0.57~ 1.24	1.69~ 2.11	-	0.00~ 0.0	IACF (2020)

은 화강암, 대리암 그리고 석회암 슬러지의 화학분석 결과를 정리하였는데 암종에 따라서 주 성분의 농도가 크게 변하는 것을 보여준다. 즉 SiO₂의 경우 0.18~85.50 %, CaO는 4.90~83.22, Fe₂O₃는 0.05~36.8wt.% 였다. 석회석 슬러지의 경우 Ca와 LOI 값이 매우 높다. 반면에 제주도 현무암의 석분 슬러지의 분석 결과 SiO₂>Al₂O₃>Fe₂O₃>CaO, MgO, Na₂O 순으로 확인되며 동일 암종이라 화학성분의 차이는 크지 않았다. 수도권의 골재 생산 원석은 토목, 건축 현장 등에서 반입되는 관계로 암종이 화학성분 조성에 영향을 줄 것으로 판단된다. Table 3의 CaO 함량이 비교적 적은 것은 비 탄산염암들이 골재 생산에 사용되는 것으로 판단이 되었다. 석분의 화학조성이 암종에 달라짐으로서 구성 성분을 활용하고자할 경우 활용성 검토시 고려해야할 요소로 판단된다.

3.4. 석분 및 슬러지 연구 동향

- 콘크리트 재료 연구

석분을 콘크리트의 배합물을 사용했을 때 물리적 화학적 특성 평가에 대한 다양한 연구들이 진행되었다(Binici et al. 2007; Burak, 2007; Alzboon and Mahasneh, 2009; Kim et al. 2012; Song and Choi, 2013; Seo et al. 2015; Rana et al. 2016; Kang, 2017; Yon et al. 2017). Nabil and

Joulani (2011)은 중동 West bank 지역에서도 석재 슬러지의 발생과 매립에 따른 환경적 문제점을 언급하고 석재 슬러지의 활용 분야로 타일, 벽돌 등 건축 재료, 콘크리트 재료 및 물성 향상 부재료로 활용 가능성을 제시했다. 가장 많은 연구가 진행된 분야중의 하나로 여겨진다.

- 지오폴리머(Geopolymer) 제조 연구

지오폴리머는 공유 결합된 비결정질 Si-O-Al 네트워크로 정의되며 여기서 공유 산소에 의해 SiO₄ 및 AlO₄ 사면체가 연결되어 조밀한 비정질부터 반결정질 3차원 골격을 형성한다(Amritphale et al. 2019; Kim, 2000). 이들의 출발 원료가 지질학적 기원이며, 지오폴리머의 형성이 무기 중합 및 축합 반응을 통해 진행되기 때문에 지질학적 고분자(geological polymer)라고 불린다. 지질학적 기원(예: 카올리나이트, 점토) 또는 비산회, 과립형 고로슬래그, 적니, 폐지 슬러지, 왕겨회, 밀짚회 등과 같은 산업 부산물을 이용해서 지오폴리머를 생산할 수 있다. 흔히 제조한 지오폴리머는 건설 부문의 활용을 목적으로 한다. 국내외에서 지오폴리머 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다(Table 5). Son et al. (2011)은 폐콘크리트 처리시 발생하는 슬러지를 출발 물질로 사용해서 고로슬래그, 석탄회 그리고 황산화제를 이용해서 지오폴리머를 제

Table 5. Cases of geopolymer studies

Sources of sludge	Additives	Activators	Thermal treatment (°C)	Geopolymer product	Ref.
sewage sludge	power of glass	Water glass	700	Brick, waste glass content of 90wt.% or more at 750 degrees meets the physical property specification	Jeong et al. (2013)
alumina aggregate	fly ash, furnace slag	Potassium silicate	1,000	Heat-resistant building material. Maximum residual compressive strength at 800 °C	Kim et al. (2017)
aggregate sludge	feul ash, metakaoline	Na ₂ O, SiO ₂		Aggregate	Lampris et al. (2009)

작했다. 슬래그 및 석탄회 대비 슬러지를 최대 60% 혼합하고 활성재의 비율을 달리해서 60°C에서 양생하여 압축강도를 측정했다. 재령 초기 46.3MPa 압축 강도를 발현해서 우수한 압축강도를 특성을 확인해서 지오폐리머 생성을 확인한 바 있다. Jeong et al. (2013)은 하수슬러지를 이용해서 경량벽돌의 물성 변화를 관찰한 사례가 있다. 국내 하수슬러지 발생량은 2011년도에 약 300만 톤 정도에 달했고 당시 해양투기 비율이 높아서 하수슬러지에 대한 처리방안이 시급히 요구되고 있었다. Lampris et al. (2009)는 골재 세척과정에서 발생하는 실트질 슬러지에 메타카올린(metakaolin)과 분쇄한 회(feul ash)를 재료로 하고 NaOH 및 sodium silicate solution (Na₂O: 7.5~8.5%, SiO₂: 25.5~28.5%) 를 알칼리 활성제(activator) 로 사용하여 silt geopolymer를 제조했다. 석분 슬러지의 aluminosilicate 특성으로 지오폐리머를 생성할 수 있었다.

- 내화 단열제 연구

제주도내 골재 생산의 대상 원석은 현무암으로 이때 발생하는 슬러지의 처리도 많은 도전이 되고 있다. IACF(2020)는 폐기물인 석분 슬러지를 원료화로 가공하면 반출이 가능할 수 있다는 아이디어로 미네랄 울 제조 연구를 추진했다. 미네랄 울은 천연 암석, 석회석, 슬래그 등을 주원재료로 고온에서 용융 액화시켜 원심 분리 공법으로 만든 무기질 섬유로서 건축, 내화벽, 산업용으로 사용된다. 제주도내에서 발생하는 현무암의 폐석 및 석분 슬러지를 이용한 불연 단열재인 미네랄울과 무기내화 단열제 연구가 있었다(IACF, 2020). 현무암 석분 및 고로, 망간, 제강, 규석 첨가제로 여러 배합물을 조성하고 무기섬유를 제조한 결과 용점 (1268~1369 °C)을 확인하였고 5.5µm 이하 굵기의 섬유를 수득할 수 있었다. 제주도내 현무암을 이용한 미네랄 울은 일반 미네랄 울의 시험항목인 열전도율(<0.037W/m.k), 열간수축온도(>600 °C), 섬유의 평균 굵기(<7µm) 및 입자 함유율(<4% 이하)을 만족하였다.

연구자들은 실제 사업화 단계에서 현무암 폐기물 및 재 활용 원료에 대한 반출 불허 가능성에 위험 요소가 될 수 있어서 조례 제정의 필요성을 제시했다.

- 요업 및 인조석재 제조 연구

Lee et al. (1995)에 따르면 20년 전에도 석재 슬러지는 폐기물로 분류되어 석재 슬러지의 처리 문제는 업계의 오래된 문제임을 알 수 있다. Lee et al. (1995)는 화학 성분 분석, 자력 선별, 백색도 등을 조사하고 석재 슬러지의 요업 및 산업 원료로서 사용 가능성을 평가하였다. 같은 시기에 Son et al. (1995)도 인조 석판 제조 연구를 수행하였다. 10mm~1mm 입도의 폐석 및 석분 슬러지를 원료로 배하 비율에 따라 혼합하고 불포화 폴리에스테르와 경화제로 MEKP(methylethylketone peroxide)를 첨가하여 압축 성형 시편을 제작했다. 천연 석판에 도달하기 위한 조건으로 성형압력 200kg/cm², 결합제의 양 12~15wt.% 을 확인했다. 천연 석재에 비해서 가벼운 특성과 다양한 문양 및 색상 등 인조 석재만의 장점을 확인하고 건축용 자재로서의 활용 가능성을 제시했다. Nabil(2015)은 석분 대비 시멘트의 비율이 성형체의 압축강도, 흡수율, 밀도에 미치는 영향을 평가하고 인조 석재 제조의 활용 가능성을 평가했다.

- 농업 분야

식물이 성장하기 위해서는 공기나 토양으로부터 원소를 흡수해야한다. 다량 필수원소(N, P, K), 소량필수원소(Ca, Mg, S), 미량 필수원소(Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl)는 토양으로부터 유래한다. Khan and Rana (2020)은 화강암질 석분의 매립에 문제가 되자 화강암질 석분을 화학적으로 처리되지 않은 천연 미네랄 재료로 가정했다. 화강암에는 K, Al, Ca 등 주성분과 미량성분이 포함되어 있기 때문에 토양 개량 및 비료로서 사용 가능성을 평가했다. 150µm 이하의 화강석 미분에 대하여, 전기전도도,

pH, 주성분, 영양성분, 중금속 농도를 분석한 결과 토양 pH 조절, 수분 보유력 및 영양성분의 증가시키는 재료로 사용할 수 있으며 점토가 풍부한 토양에 석분을 추가함으로써 가소성을 낮춰 토양 안정제로도 사용할 수 있다고 평가했다. 그러나 Almeida et al. (2007)은 슬러리를 토양에 첨가했을 때 토양을 뭉치게 하여 좋지 않은 결과를 초래할 수 있다는 별도의 연구도 확인된다.

- 기타

Almeida et al. (2007)은 석회석과 대리석 슬러리가 종이 제조시 광물 안료인 카울린의 최대 30%를 대체 가능하다고 평가했다. 그러나 심미적으로는 기대에 못미쳤다는 단점도 보고했다. 골재 세척 과정에서 발생하는 황토와 진흙 등의 부산물을 사용해 하수처리장의 폐수 처리 첨가제의 제조기술과 1200°C 고열 처리에 의한 경량 골재 제조 연구사례도 있다(Hankung, 2008).

4. 결 론

국내 골재는 전국에서 생산되고 있고 공제 생산 업체에 따라서 습식 혹은 건식 선별 공정을 채택하여 골재 생산시 발생하는 석분의 종류가 다르다. 습식으로 골재를 생산할 경우 물을 사용함으로 폐수처리 공정이 추가되어 습윤 상태의 케이크가 발생하나 건식으로 골재를 생산할 경우 건조한 석분이 발생한다. 원석 처리량과 골재 선별 방식에 따라서 케이크 및 석분 발생량이 다르다.

총 21개의 케이크와 석분을 광물 감정한 결과 구성광물은 석영, 운모, 장석, 점토광물로 구성되어 있었다. 케이크 시료의 경우 몬트모릴로나이트나 카올리나이트 등 점토 광물이 포함되어 있고 해사 슬러지의 경우 단순한 광물로 구성되어 있었다. 케이크의 입자 (Dx(50))는 26 μ m, 석분은 44 μ m으로 측정되었고 비표면적은 케이크가 컸다. 일부 케이크의 경우는 입경이 두 가지 입도가 혼재했다. 또한 탈수 케이크의 경우 슬러지 함수율은 다양했다. 주성분 분석 결과 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O이 높으나 문헌 조사에 따르면 암중에 따라서 주성분의 농도가 크게 변했다. 광물 조성, 물성 및 화학성분이 다양함으로 그 특성별로 석분 및 슬러지의 활용처를 탐색해야 할 것으로 판단되었다. 국내외에서 수행한 석분 및 슬러지를 대상으로 한 연구 분야는 도로 건설 및 건축 분야와 관련된 미네랄을 제조 연구, 타일, 벽돌, 인공석재 제조의 연구, 지오폴리머 생산 연구, 토양 개량 및 비료 가능성 연구 등이 확인된다. 후자의 경우는 석분의 화학적 특성을 활용토자 한 연구 사례였다. 국내의 경우 케이크는 탈수 공정에서 응집제를 사용하여 토양 및 수질 오염원으로 지

적되고 있으나 그 연구 사례는 많지 않았다. 케이크의 활용에 따른 토양 및 수질에 미치는 영향에 대한 활발한 연구가 필요해 보인다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행중인 2021년 골재자원조사 및 관리사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Alzboon K.K. and Mahasneh K.N. (2009) Effect of using stone cutting waste on the compression strength and slump characteristics of concrete. *International Journal of Environmental Science and Engineering*, v.1, p.167-172.
- Amritphale, S.S., Bhardwaj, P. and Gupta, R. (2019) Advanced Geopolymerization Technology, www.intechopen.com/chapters/67922 (2021, 9, 15)
- Binici, H., Kaplan, H. and Yilmaz, S. (2007) Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, v.2, p.372-379.
- Burak, F. (2007) Utilization of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry – self compacting concrete case. *Resources Conservation and Recycling*, No. 51, p.770-791. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.12.004
- Chungeong review (2019) www.ccreview.co.kr/news/articleView.html?idxno=205874, (2021.9.9.)
- Hankung (2008) Lightweight aggregate production using sludge, www.hankyung.com/society/article/2008051958101 (2021.9.9)
- Industry-Academic cooperation foundation(IACF) (2020) Development of textile fiber and inorganic fire-resisting insulation materials using Jeju basalt aggregate industrial by-products, p.1-268.
- Jeong, J.A., Son, Y.G. and Lee, W.K. (2013) Evaluation of the Physical Properties for Lightweight Bricks Made from Sewage Sludge and Wasted Glass. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, v.35, p.781-784.
- Kang S.T. (2017) ‘Understanding the Properties of Cement Mortar with Employment of Stone Dust considering Particle Size Distribution. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, v.18, p.715-723. doi: 10.5762/KAIS.2017.18.1.715
- Karaca, Z., Pekin, A. and Deliormanli, A.H. (2012) Classification of dimension stone wastes. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, v.19, p.2354-2362. doi: 10.1007/s11356-012-0745-z
- KBIZ (2018) Aggregate News, www.ac.or.kr/new/1431 (2021.9.9)
- Khan, M.A. and Rana, H. (2020) Granite Slurry: A Valued By-Product as Fertilizer. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, p.143-145.
- Kim, J.M., Jeong, J.Y., Choi, S.J. and Kim, B.J. (2006) The density and strength properties of lightweight foamed concrete using stone-power sludge in hydrothermal reaction condition. *Journal*

- of the Korea concrete institute, v.18, p.687-693. doi: 10.4334/JKCI.2006.18.5.687
- Kim, K.Y. (2006) A study on the application of powdered basalt sludge in construction engineering and its special characteristic, Graduate school Cheju national university, PhD Thesis, p.1-200.
- Kim, W.K. (2000) Development of inorganic binders using waste. The Korean Ceramic Society, v.3, p.97-111.
- Kim, S.C., Kim, Y.T. and Shin, D.C. (2012) Effects of Aggregate Grading on the Performance of High-Flowing Concrete with General Strength. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, v.16, p.63-72. doi: 10.11112/jksmi.2012.16.6.063
- Kim, J.H., Nam, I.T., Park, H. and Kim, K.N. (2017) Thermal property of geopolymer on fly ash-blast furnace slag system with the addition of alumina aggregate. Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, v.27, p.47-56. doi: 10.6111/JKCGCT.2017.27.1.047
- Lampris, C., Lupo, R. and Cheeseman, C.R. (2009) Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants. Waste Management, p.368-373. doi: 10.1016/j.wasman.2008.04.007
- Nabil M.A. Al-Joulani (2011) Sustainable Utilization of Stone Slurry Waste in the West Bank, ASCE, p.1345-1354. doi: 10.1061/41165(397)138
- Park, C.-G. (2020) The Current State and Application of Crushed-Stone Sludge. MRCR, v.15, p.66-72. doi: 10.14190/MRCR.2020.15.3.066
- Pratiwi, A.I.W., Idzni, F., Dara, F., Nugraha, W.C., Indriyati, Nasir, M., Syampurwadi, A. and Primadona, I. (2020) Determination and characterization of titanium in environmental waters and sludges. Earth and Environmental Science, v.483, doi:10.1088/1755-1315/483/1/012044
- Rana, A., Kalla, P., Verma, H.K. and Mohnot, J.K. (2016) Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. Journal of Cleaner Production, v.135, p.312-331. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.126
- Seo, J.Y., Choi, S.J. and Kang, S.T. (2015) Physical Effect of Adding Stone Dust Sludge on the Properties of Cement Mortar. JRCR, v.3, p.152-158. doi: 10.14190/JRCR.2015.3.2.152
- Sisa press (2021) www.sisajournal.com/news/articleView.html?idxno=139522 (2021., 09, 16)
- Son, J.S., Kim, B.G. and Kim, C.K. (1995) Manufacture of artificial stone using waste stone and stone power sludge. J. Korean Inst. Resources Recycling, v.4, p.4-11.
- Son, S.G., Lee, U.K., Jeong, H.J., Lee, S.H. and Kim, Y.D. (2011) Inorganic and Construction Waste Treatment and Recycling: Effect of Waste Concrete Sludge on Compressive Strength of Geopolymer Paste, Korean Society for Waste Recycling. Korea Society of Waste Management, p.145-47.
- Song, J.W. and Choi, J.J. (2013) The Influence of Fine Particles under 0.08 mm Contained in Aggregate on the Characteristics of Concrete. Journal of the Korea Concrete Institute, v.25, p.347-354. doi: 10.4334/JKCI.2013.25.3.347
- Torres, P., Fernandes, H.R., Agathopoulos, S., Tulyaganov, D.U. and Ferreira, J.M.F. (2004) Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. Journal of the European Ceramic Society, v.24, p.3177-3185. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.039
- Turgut, P. and Algin, H.M. (2007) Limestone dust and wood sawdust as brick material. Building and Environment Journal, v.42, p.3399-3403. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.012
- Yoon, C.W., Um, N.I., Kim, W.I., Kang, Y.Y., Chung, D., Kim, K.H. and Shin, S.K. (2017) Feasibility as a Potential Substitute of Natural Resources: A Case of Waste Stone and Waste Stone Sludge Produced by Stone Grinding Operation. Journal of Korea Society of Waste Management, v.34, p.148-158.
- Yu, C. (2008) Rural environment maintenance through industrial by-product recycling. The Korean Society of Agricultural Engineers, v.50, p.30-41.