

석분슬러지 발생현황 및 활용방안

The Current State and Application of Crushed-Stone Sludge



박창건 Chang-Gun Park
 유진기업(주) 연구원
 E-mail : changgun.park@eugenes.co.kr

1. 서론

산업 전반에서 발생하는 폐콘크리트, 폐유리 등 산업부산물의 재활용에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며 산업부산물 재활용에 따른 경제적, 환경적인 효과는 매우 크지만 품질 불안정, 공급원의 한계, 부족한 관련 제도 등의 문제로 실질적인 실용화는 어려운 것이 현실이다. 건설산업에서 고로슬래그 미분말과 플라이애시와 같은 고부가가치재료를 발굴하기 위해서는 보다 다양한 접근과 시도가 필요하다. 이에 본고에서는 산업부산물 재활용에 대한 하나의 안으로 파쇄공정을 통해 부순모래 생산 시 다량 발생되고 있는 석분슬러지의 콘크리트용 원료로서 활용 가능성에 대해 기술하고자 한다.

정부의 연도별 골재수급계획을 기반으로 전국 석분슬러지 발생 추이를 분석하고, 석분슬러지의 결합재로서 특성과 콘크리트용 재료로의 활용성을 검토하였다.

2. 석분슬러지

2.1 개요

골재는 콘크리트 내 용적 비율이 65~80%로 콘크리트 구성의 대부분을 차지하는 중요한 재료로서 강모래와 강자갈과 같은 천연골재를 사용하는 것이 가장 효과적이지만 건설산업 발전에 의한 사용 증가로 고갈된 상태이며, 그 외 하천, 바다 등에서 생산되는 천연골재는 환경문제와 각종 민원으로 인해 일부 연안에서만 채취가 허용되어 안정적인 수급이 어려운 실정이다. 2017년 국토교통부에서는 바다모래 채취 중단을 시작으로 산림모래, 부순모래 확대 등의 골재원 다변화와 더불어 2022년까지 바다골재

(이하, 바다모래)의 비중을 5% 수준으로 감축하겠다는 ‘골재수급 안정대책’을 발표한바 있다.

바다모래를 포함한 천연골재의 수급이 감소함에 따라 레미콘 산업에서도 천연골재를 대체하여 파쇄 공정을 통해 생산되는 부순골재의 사용이 보편화되고 있다. 경제적, 환경적 요인으로 향후 부순골재의 사용은 지속적으로 증가할 것이며 이에 따라 부산물인 석분슬러지 발생량도 증가할 것으로 전망된다. 현재 석분슬러지는 활용에 대한 연구성과 부족으로 실질적인 성토재·복토재·도로기층재·채움재 등으로의 재활용 실적이 미비하며 폐기 처리에 적지 않은 비용이 발생되어 사업장에서 는 방치 또는 자체매립 처리하는 방식을 채택하는 경우가 대다수이다.

2.2 석분슬러지 발생 공정

부순모래는 <그림 2.1>과 같이 암석을 ①1차 파쇄공정→②2차 파쇄 및 입형 개선→③ 입도 선별 및 세척 공정을 통해 생산된다. 이 과정 중 세척 공정에서 발생한 세척수에는 미립분이 다량 함유되어 있으며 침전조에서 1차 침전 후 Filter Press

탈수 공정을 통해 케이크 형태의 슬러지를 배출시킨다. 이때 배출되는 슬러지가 석분슬러지이다.

3. 석분슬러지 발생 추이

3.1 연도별 골재공급 실적

[표 3.1]은 골재공급원별 공급실적을 나타내며 남해 EEZ 바다모래 채취중단, 웅진 및 태안 연안 바다모래 채취 지연 등으로 인하여 바다모래의 공급실적이 2017년부터 감소하는 반면 산림, 육상, 신고골재는 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 순환 및 기타는 슬래그골재, 순환골재 등을 포함하며 부산물을 활용한 대체골재자원 개발은 지속적으로 검토되고 있다.

3.2 석분슬러지 발생량

석분슬러지는 골재 공급원 중 산림 및 신고 물량에 의해 모래 생산 시 발생된다. 석분슬러지의 발생량에 대한 정확한 통계는 집계되지 못하여 국토교통부 연도별 골재수급계획에 제



① Hopper&Jaw Crusher



② Cone&Impact Crusher



③ 살수 스크린



④ 침전조



⑤ Filter Press



⑥ 석분슬러지 배출

그림 2.1 석분슬러지 발생 공정도

[표 3.1] 골재 공급원별 공급실적

(단위: 천m³)

	허가				신고	순환 및 기타
	하천	바다	산림	육상		
2014	3,851	25,294	51,955	3,993	59,999	56,332
2015	1,315	23,784	58,774	4,437	69,625	45,482
2016	2,952	32,738	78,143	4,271	79,794	32,741
2017	2,708	19,197	60,538	16,046	83,782	45,908
2018	2,660	8,260	73,425	15,760	87,173	64,212
2019	854	2,176	88,892	14,948	123,093 (선별·파쇄 69,024)	

* 출처 : 연도별 골재수급계획 보고자료(국토교통부, 2015 ~ 2020)¹⁾

[표 3.2] 신고골재 분류에 따른 공급실적

(단위: 천m³)

	선별파쇄	선별세척	신고 공급실적
2014	52,607	7,392	59,999
2015	61,125	8,500	69,625
2016	57,657	22,137	79,794
2017	73,451	10,331	83,782
2018	**	****	87,173
2019	69,024	****	***

* 출처 : 연도별 골재수급계획 보고자료(국토교통부, 2015 ~ 2020)¹⁾

** 2018년 선별파쇄 실적 미제시

*** 2019년 선별파쇄 실적 미제시(선별파쇄, 순환, 슬래그 등 통합 제시)

**** 선별세척 실적 미제시

시된 허가 물량 중 산림골재, 신고 물량 중 선별파쇄골재에 대한 자료를 활용하여 추산하였다. 산림골재는 일반적인 석산에서 생산되는 물량으로 부순 자갈 생산 후 8mm이하의 석분을 샌드플랜트에서 입형 개선 및 선별세척하여 부순모래를 생산한다. 신고골재는 건설 현장에서 발생된 암석 등을 크러셔로 선별파쇄 된 부순모래와 선별세척된 바다모래를 포함하고 있다. 이에 [표3.2] 신고골재 분류에 따른 공급실적 중 2014~2017년 통계를 바탕으로 선별파쇄가 차지하는 비율을 추산하였으며 평균 83.8%로 확인되었다.

일반적으로 석산에서 석분슬러지는 원석 기준 3~5%, 부순모래 생산량 기준 15~17% 가량 발생된다. 앞서 도출된 선별파쇄 구성 비율과 2020년도 허가 및 신고 모래 공급계획을 바탕으로 올해 석분슬러지 발생량을 추산한 결과, 약 13백만 m³의 석분슬러지가 발생될 것으로 추정되며 이는 전용면적 85m² 아파트를 14만세대 지을 수 있는 콘크리트 물량과 동일



그림 3.1 2020년도 지역별 석분슬러지 추정량

[표 3.3] 연도별 부순모래 생산량 및 석분슬러지 추정량

(단위: 천³m)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
부순모래	42,263	43,353	42,403	57,568	63,525	79,546	75,473
석분슬러지	7,458	7,650	7,483	10,159	11,210	14,037	13,319

* 부순모래 생산량 출처 : 연도별 골재수급계획 보고자료(국토교통부, 2015 ~ 2020)¹⁾

[표 3.4] 오폐수 처리현황(2018년)

	재활용	소각	매립	기타	보관
발생량(톤)	57,394	8,949	400,704	6,719	3,481
비율(%)	12.0	1.9	84.0	1.4	0.7

* 출처 : 2019년 지정폐기물 발생 및 처리 현황²⁾

[표 4.1] 석분슬러지 화학 조성(XRF 분석)

(단위: %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Cl
54.11	17.02	8.10	6.52	0.67	3.05	0.08

한 양이다. 같은 방식으로 2020년도 지역별 석분슬러지 발생량 및 연도별 석분슬러지 발생량을 추산한 결과, 그림 3.1, 표 3.3과 같다. 바다모래 채취 중단 후 부순모래 사용량과 석분슬러지 발생량이 증가 추세에 들어선 것을 확인할 수 있다. 현재 폐기물관리법에 의하면 ‘슬러지’는 사업장폐기물 중 오폐수로 분류되며 [표 3.4]의 2018년 오폐수 처리현황에 따르면 총 발생량 474,168 톤 중 80 % 이상이 매립 처리된 것을 확인할 수 있다.

4. 석분슬러지의 콘크리트 혼화재료 사용성 검토

해외에서 골재에 포함된 0.08mm체 통과량의 허용치는 영국15%이하, 프랑스12~18%이하(용도에 따라), 호주10%이하(구입자가 허용하는 경우 25% 이하)⁴⁾, 국내의 경우 천연 잔골재 5%이하, 부순 잔골재 7%이하로 규정³⁾하고 있다. 이와 같이 국내에서는 미립분이 다량 포함된 골재 사용에 따라 발생하는 유동성 저하, 건조수축 증가 등의 콘크리트 품질 문제에 대한 우려로 인해 해외와 비교하여 엄격하게 관리하고 있다. 이에 송진우(2013)⁴⁾는 다양한 종류의 미립분 검토를

통해 KS F 2527의 0.08mm 체 통과량의 허용범위 상향 가능성을 확인하였으며, 그 외에도 콘크리트용 재료로서 잔골재 치환, 결합재 치환 등 일반콘크리트 배합에 적용하기 위한 다양한 연구⁵⁻⁹⁾가 진행되었다.

본고에서는 모르타르 시험을 통해 석분슬러지의 유동성 및 강도 발현에 대한 결합재 특성을 파악하였으며 해당 결과를 토대로 실제 콘크리트 배합에 대해 적용성 검토를 실시하였다. 석분슬러지는 케이크 형태의 슬러지를 건조·분쇄한 미분말 형태로 사용하였으며 물리적 특성은 밀도 2.69, 비표면적 5,900~6,300 cm²/g, 화학 조성은 [표4.1]과 같다.

4.1 석분슬러지 결합재 특성 검토(모르타르)

미립분 형태의 석분슬러지는 시멘트 대체 혼입 시 동일 유동성 확보를 위해 물 또는 혼화제의 추가 혼입이 요구된다.^{4,9)} 이를 고려하여 본 장에서는 시멘트와 동일 수준의 유동성 확보를 위한 석분슬러지의 물결합제비 산정방법 도출과 석분슬러지 혼입에 따른 강도발현 특성평가를 목적으로 모르타르 시험을 실시하였다. 석분슬러지 혼입률은 시멘트 질량비 5~35%로 선정하였으며 시멘트 및 석분슬러지에 대해 각각의 물결합

[표 4.2] 석분슬러지 W/B 산정방법 및 혼입률에 따른 모르타르 배합

구분	W/C [*] (%)	W/SS ^{**} (%)	W/B ^{***} (%)	W(g)	C(g)	SS		S(g)
						혼입량(g)	혼입률(%)	
Plain	50	50 (W/C × 1.0)	50.0	225.0	450.0	0.0	0	1350.0
1.0-5					427.5	22.5	5	
1.0-15					382.5	67.5	15	
1.0-25					337.5	112.5	25	
1.0-35					292.5	157.5	35	
1.5-5		75 (W/C × 1.5)	51.3	230.6	427.5	22.5	5	
1.5-15			53.8	241.9	382.5	67.5	15	
1.5-25			56.3	253.1	337.5	112.5	25	
1.5-35			58.8	264.4	292.5	157.5	35	
2.0-5		100 (W/C × 2.0)	52.5	236.3	427.5	22.5	5	
2.0-15			57.5	258.8	382.5	67.5	15	
2.0-25			62.5	281.3	337.5	112.5	25	
2.0-35			67.5	303.8	292.5	157.5	35	

* W/C : 시멘트에 적용된 물결합재비

** W/SS : 석분슬러지에 적용된 물결합재비(W/C × 1.0~2.0)

*** W/B : 전체 결합제(시멘트+석분슬러지) 기준 물결합재비

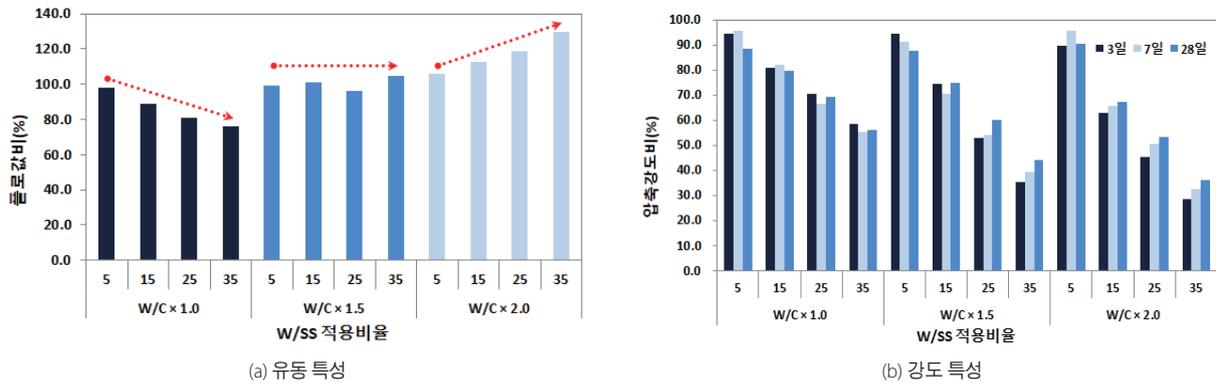


그림 4.1 석분슬러지 혼입 모르타르 특성평가결과

재비를 적용하였다.

유동성 시험결과, 석분슬러지에 시멘트 물결합재비 1.0배 (W/C × 1.0)의 물결합재비 적용 시 석분슬러지 혼입률 증가에 따라 유동성 감소폭이 증가하였으며 시멘트 물결합재비의 1.5배(W/C × 1.5)에서는 석분슬러지 혼입률과 무관하게 Plain과 유사한 수준의 유동성이 나타났다. 시멘트 물결합재비의 2.0배(W/C × 2.0)를 적용한 경우, 석분슬러지 혼입률 증가에 따라 유동성이 크게 증가하였다. 유동성 평가를 통해 석분슬

러지 혼입에 따른 물결합재비 산정은 석분슬러지 혼입률에 대해 시멘트 물결합재비의 1.5배로 수량을 조정하여 사용하는 방법이 효과적일 것으로 판단된다.

압축강도 시험결과, 석분슬러지 물결합재비 적용 비율 증가(W/C × 1.0~2.0)에 따라 수량 증가로 인해 강도감소가 나타났다. 석분슬러지 혼입률에 따른 강도발현특성에서는 혼입률 5%에서 Plain 대비 90%, 혼입률 15%에서 80% 수준의 강도발현이 확인되었다. 강도발현특성을 고려할 경우 강도발현에 기

[표 4.3] 석분슬러지 혼입 콘크리트 배합

	W/C*	W/SS**	W/B***	단위 재료량(kg/m ³)							혼화제(B _w %)	
				W	OPC	GGBS	FA	SS	S	G	AD	AE
Plain	36.0	-	36.0	180	350	100	50	-	900	675	1.25	0.03
S10W		54.0 (W/C × 1.5)	37.8	189	300			50	882	662	1.25	
S10A		45.0 (W/C × 1.25)	36.9	185					889	667	1.45	

* W/C : 시멘트류 결합재(시멘트+고로슬래그 미분말+플라이애시)에 적용된 물결합재비
 ** W/SS : 석분슬러지에 적용된 물결합재비(W/C × 1.25~1.5배)
 *** W/B : 전체 결합재(시멘트+고로슬래그 미분말+플라이애시+석분슬러지) 기준 물결합재비

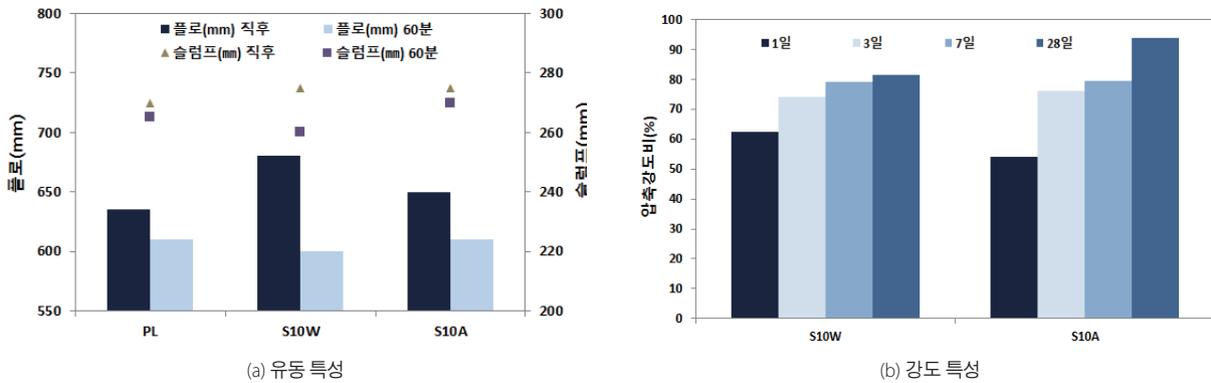


그림 4.2 석분슬러지 미분말 혼입 콘크리트 특성평가결과

여하는 혼화제료로서 일반적인 콘크리트 적용에는 추가적인 검토가 필요하며 충전재 개념으로의 활용은 가능할 것으로 판단된다.

4.2 실패합 적용성 평가(콘크리트)

보편적인 레미콘 배합 검토 결과, 일반 콘크리트 제품 규격 25-30-150 기준 400 kg/m³의 결합재가 적용되고 있으며, 동일 강도 고유동 콘크리트 제품 규격 25-30-600에서는 유동성 확보, 재료분리 방지를 위해 500 kg/m³의 결합재가 사용되고 있다. 강도 규격만을 고려할 경우, 100 kg/m³의 결합재가 부배합으로 적용되고 있는 실정이다. 본 실험에서는 일반강도 고유동 콘크리트 제조를 위해 적정 강도수준을 만족시키는 석분슬러지 사용방법에 대해 검토하였다.

목표강도는 부배합으로 사용되는 100 kg/m³의 결합재를 제

외한 수준으로 Plain 대비 80% 이상으로 설정하였다. 콘크리트 배합은 [표4.3]과 같으며 석분슬러지 혼입률은 전체 결합재 질량비 10%로 시멘트에 대해 치환하였다. S10W는 모르타르 시험을 통해 도출된 석분슬러지 물결합재비(W/C × 1.5)를 적용하여 석분슬러지 혼입에 따른 유동성 감소를 보완하였으며, S10A의 경우 단위수량 증가에 따른 강도감소를 고려하여 석분슬러지 물결합재비를 절반(W/C × 1.25) 적용하고, 혼화제 추가 혼입을 통해 유동성을 확보하였다. 혼화제만으로 유동성을 조정하는 경우, 모르타르 시험을 통해 혼화제 과다 사용이 확인되어 실험에서 제외하였다.

콘크리트 실험결과, 모든 배합에서 경시변화(초기 및 60분)에 따른 슬럼프 플로의 허용 오차 600 ± 100 mm 이내의 유동성을 확보하였다. S10W의 경우, 재령 28일 Plain 대비 81%의 강도발현으로 목표성능을 만족하였으며 S10A는 전체 결합재 중 시멘트 사용량이 10% 감소되었음에도 Plain 대비 94%의

높은 강도발현이 나타났다. 결합재 특성을 고려한 물결합재비 및 혼화제 조절을 통해 콘크리트용 충전재로서 10 % 내외로 적용가능 할 것으로 사료된다.

5. 결론 및 시사점

본 기고에서는 천연자원 보호, 산업부산물 재활용 확대, 시멘트 사용량 감소에 기여할 수 있는 하나의 방안으로 석분슬러지 활용에 대해 검토하였다. 국토부의 연도별 골재수급계획 보고자료를 통해 석분슬러지 발생 추이를 분석하였으며 석분슬러지의 적정 물결합재비 산정방법에 대해 검토하였다. 이

를 활용하여 부배합으로 배합설계되는 일반강도 고유동 콘크리트에 콘크리트용 충전재로 적용하였으며, 10 % 내외의 시멘트 사용량 절감효과가 기대된다. 본 실험을 통해 특수 콘크리트에 대한 석분슬러지의 활용 가능성을 확인하였다. 최종적으로 석분슬러지의 제품화를 위해서는 건조수축, 탄산화 등 다양한 콘크리트 특성에 대한 추가적인 검토가 이루어져야 할 것이며 범용성을 갖추기 위해 효율적인 건조·분쇄 방식의 개발과 더불어 일반 콘크리트 배합에도 적용 가능한 방안 도출이 요구될 것이다. 이렇듯 석분슬러지가 실용화되기까지는 오랜 시간이 소요될 수 있으나 다양한 시도와 검증을 통해 산업부산물의 고부가가치화를 이룬다면 이로 인한 경제적, 환경적 효과는 매우 클 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 연도별 골재수급계획 보고자료(국토교통부, 2015 ~ 2020)
2. 2019년 지정폐기물 발생 및 처리 현황
3. 콘크리트 표준시방서(2016)
4. 송진우 외 1인, '골재 중 0.08 mm 이하 미립분의 종류가 콘크리트의 특성에 미치는 영향', 한국콘크리트학회, 제25권 제3호 pp.347-354, 2013
5. 김영욱 외 5인, '고로슬래그 대량 사용 모르타르에서의 석분슬러지 혼입에 따른 유동성 및 강도특성', 한국건설순환자원학회 봄학술대회, 2017
6. 강수태, '입도분포를 고려한 석분 사용에 따른 시멘트 모르타르 성질의 변화 이해', 한국산학기술학회논문지 제18권 제1호, 2017
7. 윤철우 외 6인, '석재가공과정에서 발생하는 폐석재 및 폐석분슬러지의 재활용을 위한 물리·화학적 특성 및 환경성 평가' 한국폐기물자원순환학회, 제34권 제2호 pp.148-158, 2017
8. 서준영, '석분슬러지를 활용한 콘크리트의 특성에 관한 연구', 대구대학교 석사학위논문, 2015
9. 이재호, '석분슬러지를 시멘트 치환재로 사용한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구', 충북대학교 석사학위논문, 2013

담당 편집위원 : 박원준(강원대학교)