

산업부산물 재활용 골재의 현황 및 문제점

The current status and problems of aggregate using recycled industrial by-products in the construction industry



이현기 Hyeongi Lee
 (주)브리콘랩, 대표이사
 E-mail : hyeongi84@gmail.com

1. 서언

최근 국내 대규모 아파트단지 개발, SOC 사업 등 대규모 건설공사가 증가하고 있는 추세에 따라서 안정성과 경제성이 확보된 콘크리트의 수요 역시 급증하고 있다.^{1) 2) 3)} 그러나 콘크리트의 주요 구성분인 골재의 수급 문제로 인한 공사비 증가, 공사중단 등 현실적 어려운 문제가 발생하여 건설 산업이 해결해야 할 중요한 과제로 급부상하고 있다. '20년 기준 국내 골재채취 실적을 보면 모래 43,711천 m³, 자갈 87,591천 m³ 채취하고 있으나 건설시장에서 필요한 수요량에 비하여 매우 부족한 실정이다. 이와 같은 현실적 어려움에도 불구하고 그동안 정책적 지원을 받지 못해 천연골재자원의 고갈과 함께 골재공급환경이 날로 악화되고 있는 실정이다. 또한 사전환경성 평가제도, 환경영향성 평가, 해양골재의 채취총량제, 계단식 채석 의무화 등과 같이 환경적 용인에 의한 채취 규제가 강화되면서 골재업계의 채산성이 악화되고 있다.

특히 천연골재자원의 고갈로 대체석산개발이 필요한데도 국토난개발, 환경훼손 등의 주범처럼 부정적 측면이 부각되고 있어 건전한 석산개발을 체계적으로 육성하는 제도적 개선방안 마련이 시급하다는 지적이다.

국토교통부 고시 제6차 골재수급 기본계획(2019~2023)에 따르면, 하천, 바다 등 천연골재원의 지속적인 감소를 고려하여 산림골재를 최대한 활용하되 부족분에 한해 대체골재 공급을 계획하고 있다. 하지만 다음 <그림 1>과 같이 2019년부터 2022년까지 대체골재의 계획 대비 실제 공급량의 차이가 11.0%에서 17.5%로 지속적인 증가추세를 보인다.⁴⁾ 이는 공급과정에서 불가피한 자연환경 훼손을 우려한 각 부처의 천연골재원에 대한 개발 규제에 기인한 것으로 해당 현상은 시간이 지남에 따라 더욱 심화될 것으로 예상되며, 따라서 순환골재, 인공골재 등 대체골재의 사용량을 확대할 수 있는 해결책을 마련해야 한다.

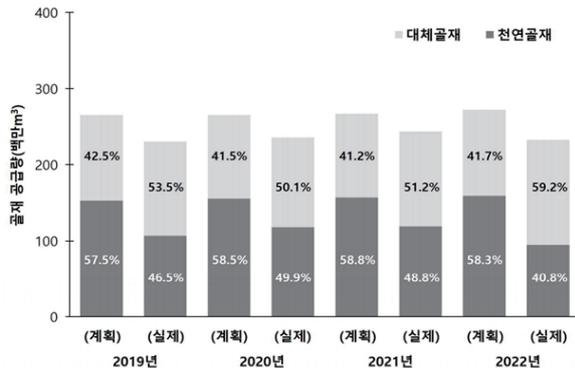


그림 1. 계획 및 실제 골재 공급량 (2019~2022)



(a) 충남 당진 송산2일반산업단지

(b) 전남 광양항



(c) 경남 거제 매립지



(d) 전남 여수 울촌산업단지

그림 2. 슬래그골재로 인한 강알칼리성 유출수 피해 현장

이와 같이 대체골재를 활용하기 위해 천연골재 대체재로서 순환골재와 산업부산물을 재활용한 골재 등 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다. 하지만 순환골재의 경우 건설폐기물 처리 능력과 경제적인 이점으로 인해 순환골재 사용을 적극 장려해 왔지만 순환골재에 잔존하는 시멘트 페이스트로 인한 유해성 논란이나 잦은 하자, 부실 등 품질 문제가 불거지면서 현재까지는 비구조부재 또는 산업단지 조성 등에만 적용하는 등의 한계를 보이고 있다. 산업부산물을 재활용한 골재의 경우에는 고로 슬래그, 제강슬래그와 같은 산업부산물에 대한 안정성이 확보되어 콘크리트용 골재(KS F 2527)로 활용하고 있고, KS F 2790으로 콘크리트용 페로니켈슬래그 잔골재 사용이 규정되었으나 이에 대하여 관련 연구 및 실적은 미비한 실정이다. 다음 [표 1]은 건설폐기물 및 슬래그의 발생량과 재활용을 나타내고 있다.^{5) 6)}

이와 같이 건설폐기물에서 재활용되는 순환골재와 산업부산물의 특히 철강 슬래그의 경우 높은 재활용율에도 불구하고 순환골재 및 슬래그골재에 포함된 다량의 산화칼슘(CaO)의 함량으로 인해 인접 지역의 수생태계 피해 문제를 야기하고 있다. 특히 산업부산물 중 제강슬래그의 경우 2022년 9월 당진시 산업단지 민간환경감시센터에서 발간된 조사보고서에 의하면 H사에서 발생한 슬래그골재를 성토재로 적용한 현장에서 유출된 강알칼리수(pH 12.5 이상)가 인근 농경지 및 성문호로 유입되어 많은 민원이 제기되는 사례가 있다. 뿐만 아니라 <그림 2>와 같이 전남 광양, 전남 여수, 경남 거제 등 전국적으로 이와 유사한 사례가 다수 보고된 바 있다.

[표 1] 건설폐기물 및 슬래그 발생량 및 재활용율

(단위: 만톤/년)

구분		2016	2017	2018	2019	2020	2021
건설 폐기물	발생	7,280	7,164	7,554	8,070	8,644	8,381
	재활용	7,141	7,025	7,422	7,983	8,556	8,318
철강 슬래그	발생	-	-	-	-	2,666	2,657
	재활용	-	-	-	-	2,672	2,707

2. 산업부산물 재활용 골재

2.1 석탄회

석탄회는 화력발전소의 연료인 석탄이 고온으로 연소하고 남은 회분이 급격히 냉각돼 만들어진 미세 입자로, 일종의 연탄재라 할 수 있다. 이 중 일부는 콘크리트 혼화재나 시멘트 원료로 활용되지만, 대부분은 발전소 인근 회처리장에 매립하고 있다.

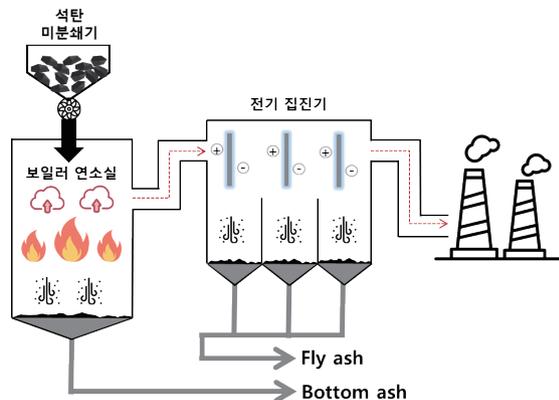


그림 3. 화력발전소 발생 석탄회의 처리 과정에 따른 분류

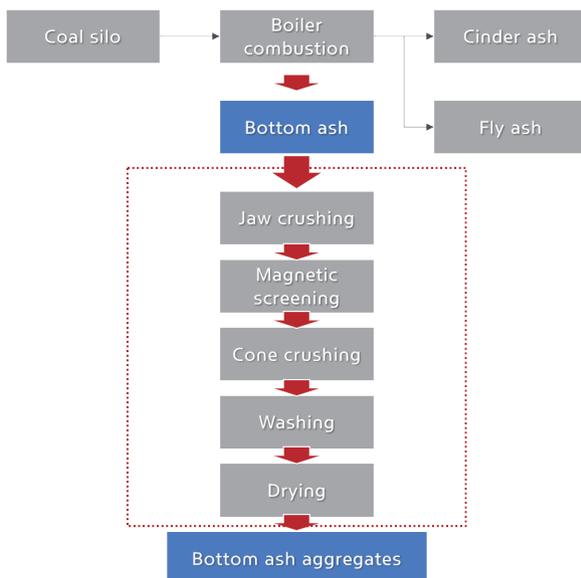


그림 4. 일반적인 바텀애시 골재 제조 공정

<그림 3>과 같이 석탄회는 포집되는 공정에 따라 크게 플라이애시(Fly ash), 바텀애시(Bottom ash)로 구분할 수 있으며, 플라이애시는 석탄화력발전소에서 석탄 연소 후 발생하는 발전소 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 그 화학적/물리적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자 형태로 포졸란성(Pozzolan)을 지니고 있을 뿐만 아니라 여러 측면에서 시멘트 대체재로 우수한 특성을 지니고 있다. 바텀애시는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 노벽, 과열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 보일러 하부의 호퍼(hopper)에 떨어져 수집된 것이고, 전체 석탄회 발생량 중 약 10% 정도를 차지한다. 배출 공정에 따라 특히 습식으로 배출된 바텀애시(Bottom ash)는 미연탄으로 인한 높은 염화물 농도와 다공질 특성으로 콘크리트 재료로 사용할 경우 강도 및 내구성 저하 등 품질에 악영향을 주어 대부분 매립되거나 저부가가치적 용도로 일부 활용되고 있다. 일반적으로 바텀애시 골재 재활용 공정은 <그림 4>와 같다.⁷⁾⁸⁾

이에 따라 바텀애시의 기능성 및 부가가치를 부여하기 위해 건식으로 처리되는 바텀애시를 기계적 에너지를 이용 단순히 파쇄, 성형하여 인공경량골재를 제조하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이와 같은 공정으로 제조된 인공경량골재는 압축강도, 휨강도 등이 경량골재 품질기준을 만족하는 것으로 확인되어 구조용 경량골재로도 활용이 가능한 것으로 보고되고 있다.

추가 연구로는 상기 연구의 생산과정에서 발생하는 에너지 비용을 저감하기 위해 산업부산물인 고로슬래그·제강슬래그와 플라이애시·바텀애시 분말 등을 탄산칼슘, 수산화칼슘 등과 혼합하여 알칼리 자극을 통해 경화시켜 골재화하는 등의 재활용 공정의 고도화를 통한 기능성을 추가하여 부가가치를 높이는 연구도 활발히 진행되고 있다.⁹⁾

2.2 철강 슬래그

철강 슬래그는 고로, 전호 및 전기로 등에서 금속을 제조할 때 더스트, 부생가스 등과 함께 생성되는 부산물 중 하나로서 공정에서 발행되는 전체 부산물의 90% 가량을 차지하는 폐자원이다.

제조 금속의 종류에 따라 발생하는 슬래그를 다음 <그림 5>와 같이 분류할 수 있다. 고로에서 선철(pig iron)을 만들 때 생성되는 것이 고로슬래그이며, 전로나 전기로에서 강을 만들 때 생성되는 것이 제강슬래그이다. 제강슬래그는 제강로에 따라서 각각 전로 슬래그 또는 전기로 슬래그라고 정의된다. 세부적으로 고로에서는 철광석을 코크스와 석회석과 함께 열풍(hot air)이나 산소를 불어 넣으면서 고온에서 용해하며, 코크스의 탄소로 환원해서 선철을 만든다. 철광석의 철 이외의 성분은 석회석과 코크스 속의 회분(ash content)과 함께 분리회수되는 것이 고로슬래그이다. 고로슬래그는 선철 1톤당 약 290kg이 생성되며, 고로로부터 나온 슬래그는 약 1,500℃의 용융상태이지만 냉각방법에 의해 다음 2가지의 다른 성질과 형태를 가지는 슬래그로 구분할 수 있다.

그리고 전로슬래그는 전로에 생석회를 투입하고 산소를 불어 넣어 선철에서 탄소(C)를 제거함과 동시에 생성한 슬래그를 이용해 인(P)과 같은 불순물을 흡수하면서 발생되며, 전로슬래그는 전로속의 용강 1톤당 약 110kg이 생성된다. 용선을 고로에서 전로로 운반하는 중에 S와 P 성분을 제거하는 예비처리가 실시되는데, 이때 생성되는 슬래그를 세부적으로 용선예비처리 슬래그라 한다. 용선예비처리 슬래그도 통계상으로는 전로 슬래그에 포함된다.

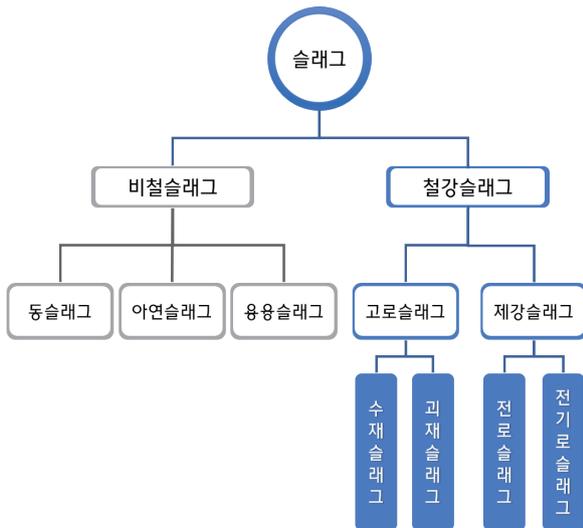


그림 5. 금속 제조 공정에 따른 철강슬래그의 분류

철강슬래그의 분류에 따른 형상으로는 고로 서랭 슬래그와 제강슬래그는 쇄석(crushed stone) 모양, 고로 수쇄 슬래그는 모래 모양과 각각 비슷하다. 고로 서랭 슬래그와 고로수쇄 슬래그의 절대건조밀도(절대건조 상태에서 질량을 절대용적으로 나눈 값)는 2.5~2.7g/cm³로 쇄석이나 모래와 같은 정도이다. 제강슬래그는 철 성분을 함유하고 있기 때문에 절대건조 밀도가 3.2~3.5g/cm³로서 쇄석보다 무거우며, 경질이기 때문에 내마모성이 우수하다. 철강 슬래그는 석회(CaO) 및 실리카(SiO₂)를 주성분으로 하고, 고로슬래그는 알루미늄(Al₂O₃)와 마그네시아(MgO), 제강슬래그는 산화제철(FeO),

마그네시아(MgO), 산화망간(MnO)을 각각 함유하고 있다. 고로슬래그와 제강슬래그는 물과 만나면 석회(CaO)이 소량 용출되고, 알칼리성을 나타낸다. 미량의 실리카(SiO₂)와 알루미늄(Al₂O₃)의 용출에 의해서 표면에 치밀한 수화생성물을 형성하고 이것이 슬래그 입자를 연결하는 결합재로 되어 시간이 경과하면 경화하는 이른바 수경성(hydronasty)을 가지는 특성으로 고로시멘트 원료, 포틀랜드 시멘트(portland cement) 혼합재, 콘크리트 혼합재로 사용된다. 특히 고로 서랭 슬래그는 용해 실리카양이 적기 때문에 알칼리 골재 반응이 일어나지 않아 콘크리트용 조골재(coarse aggregate)로 재활용되고 있다. 철강슬래그의 화학적 조성은 다음 [표 2]과 같으며, 시멘트 및 자역석과 비교하여 표현하였다. 또한 슬래그 제품과 관련된 표준 규격은 다음 [표 3]와 같다.

[표 2] 철강슬래그의 화학 조성 (단위: %)

구분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	SO ₃
고로슬래그	41.2	32.8	14.8	0.4	5.2	0.5
제강슬래그	46.1	14.8	1.5	17.4	6.3	0.1
석회석	54.0	2.0	0.2	0.1	0.1	0.1
시멘트	61.9	21.5	5.7	2.9	2.7	2.4
자연석	5.8	59.6	17.3	2.4	2.8	0.1

[표 3] 슬래그와 관련된 표준 규격

용도	관련 산업규격 및 설계시공지침
시멘트 원료	KS L 5210 (고로슬래그 시멘트) KS L 5201 (포틀랜드시멘트)
콘크리트용 혼화재	KS F 2563 (콘크리트용 고로슬래그 미분말)
콘크리트용 골재	KS F 2527 (콘크리트용 골재) KS F 4009 (레디믹스트 콘크리트)
도로용 골재	KS F 2528 (비포장 도로용 흙-골재 재료) KS F 2535 (도로용 철강슬래그)
케이슨 채움재	KS F 2579 (케이슨 채움재용 슬래그)
토목용 골재	GR F 4042 (성복토 및 뒷채움재용 철강슬래그) SPS-KCL F 8001-7030 (수평배수층용 페로니켈슬래그 골재)
암면 원료	KS L 9102 (인조 광물섬유 단열재)

3. 산업부산물 재활용 골재로의 활용 현황

3.1 바텀애시 골재

바텀애시를 재활용 골재로 적용하고자 하는 연구는 크게 3가지로 구분될 수 있다. 먼저, 바텀애시의 흡수율이나 미연탄소 함량을 감소하여 문제를 개선하는 방안에 대한 연구, 두 번째 배출된 바텀애시에 기능성을 부여하여 부가가치를 높이는 방안, 마지막으로 다른 산업부산물과 같이 재활용의 고도화 및 기능성을 향상하는 방안으로 구분될 수 있다. 먼저 첫 번째 바텀애시가 가지는 문제를 개선하는 방안에 대한 연구는 세립 분말 및 미연탄소 함량을 줄임으로써 재료 특성을 개선하고자 하는 연구가 진행되었으며, 이를 통해 잔골재로 사용하여 활용성을 평가하였다. 바텀애시를 잔골재로 사용할 경우 특별한 조치를 하지 않은 상태에서는 잔골재의 30% 미만까지 대체하는 것이 가능하고, 바텀애시 30% 이상 사용하기 위해서는 배합수나 화학혼화제를 추가 혼입하여 유동성을 확보함으로써 사용이 가능하다고 보고되고 있다. 이 때 물-시멘트 비 45% 이하인 고내구성의 콘크리트 제조를 위해서는 바텀애시 혼입량이 30%로 제한하고 있으며, 세립 바텀애시를 제

거하고 미연탄 함량을 감소시켜 성능을 개선한 바텀애시 잔골재를 사용한 경우 굳지 않은 콘크리트의 물성이 크게 개선되었고 물-결합재 비는 40% 이하로 낮아져 고내구성 콘크리트 제조가 가능한 것으로 보고되고 있다.

바텀애시의 부가가치를 높이기 위한 기능성 부여와 관련된 연구는 염화물 함량이 낮은 건식공정 배출방식을 통한 바텀애시를 이용해 경량골재로의 활용 방안에 대한 연구가 수행되었으며, 경량골재 콘크리트의 굳지않은 상태 및 경화상태에서의 다양한 특성을 실험적으로 검토함으로써 바텀애시 경량골재가 경량골재 콘크리트용 잔골재로서의 사용 가능성이 있는지의 여부를 평가하였다. 연구결과 건식 바텀애시 대체율 75%까지 슬럼프 저하가 크지 않게 나타났고, 공기량은 건식 바텀애시의 대체율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 콘크리트의 블리딩량은 건식 바텀애시 대체율 75%이하에서는 0.025 cm³/cm³미만으로 나타났으며, 콘크리트 경화 후 압축강도에서는 대체율 75%까지 강도 저하율이 10% 미만으로 나타났다. 잔골재를 건식 바텀애시로 100% 대체시 절건 단위질량은 8.9%의 감소를 보였고, 건식 바텀애시 잔골재 대체율이 증가할수록 건조수축이 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트 탄성계수는 건식 바텀애시 잔골재 대체율 50%까지는 저하를 보이지 않았지만, 대체율이 그 이상으로 증가시 탄성계수가 저하하였다. 이상의 결과로부터 건식 바텀애시는 잔골재로 사용 시 다른 잔골재와 혼합 사용할 경우 품질의 저하 없이 사용하는 것이 가능함을 알 수 있다. ^{10) 11)}

마지막으로 바텀애시 골재 제조 공정에서 발생할 수 있는 에너지 비용 절감과 다른 산업부산물과 같이 활용하여 부가가치를 높이는 연구는 플라야애시와 바텀애시를 안정적으로 재활용하기 위하여 알칼리 활성화된 석탄회 경화체 및 인공 경량골재를 제조하여 활용하고자 하였다. 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재의 콘크리트 적용을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 따라서 알칼리 활성화된 석탄회 경화체의 최적 배합비, 알칼리 활성화 석탄회 경화체와 인공경량골재의 기본적 특성, 역학적 특성과 환경안전성, 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성과 동결융해 저항성을 확인하여 콘크리트용 굵은 골재로의 활용 가능성을 확인하였다. ¹²⁾

3.2 슬래그 골재

철강슬래그의 건설분야에서 재활용 용도는 시멘트 원료뿐만 아니라 콘크리트용 혼화재, 벽돌용·콘크리트용 골재, 성토용 골재, 복토용 골재, 호안공사(기슭·둑 침식방지를 위한 공사)용 골재, 도로용·아스팔트콘크리트용 골재 등 다양한 용도로 재활용되고 있으나 대부분 부가가치가 낮은 용도로 적용되고 있다. 특히 골재로 재활용되고 있는 현황은 고로 슬래그, 전기로산화슬래그, 페로니켈슬래그가 콘크리트용 잔골재로서 작용 가능한 대안으로 제시되고 있고, 철강산업 부산물인 슬래그 잔골재는 발생량과 콘크리트용 잔골재로서 성능 및 사용에 따른 경제성 등을 고려할 경우 활용 가치가 매우 높은 것으로 보고되고 있다. 국내외로 슬래그 잔골재의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있기 때문에 향후 골재 자원으로서 매우 높은 활용 가치를 가지고 있다.

철강슬래그 중 고로슬래그는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 부산물로 구성원소는 일반 암석의 구성과 유사하며, 화학성분은 시멘트와 유사한 조성을 가지고 있다. 고로슬래그의 냉각 방식에 따라 급냉슬래그(수재슬래그)와 서냉슬래그(괴재슬래그)로 구분되며, 일반적으로 급냉슬래그는 분쇄하여 시멘트 대체제인 혼화재 또는 시멘트 원료로 사용되고, 서냉 슬래그는 노반재 및 비료 등으로 활용되고 있다. 수재 슬래그는 냉각과정에서 슬래그가 수축 파쇄되어 입자 크기가 모래와 유사한 8mm 이하의 크기로 생산되고 괴재슬래그는 40mm 이하의 크기로 생산되기 때문에 콘크리트용 잔골재로서 활용 가치는 생산 효율성을 고려할 경우 수재 슬래그가 매우 효과적인 것으로 보고되고 있다.¹³⁾ 고로슬래그 잔골재는 단독으로 콘크리트용 골재로 사용할 수 있지만 실제 사용에서는 입도 조정이나 바다모래 사용시 염분함유량 저감 등의 목적으로 천연 모래와 혼합하여 사용하는 경우가 많으며, 0.15mm 이하에서 고로슬래그미분말이 다량 함유되어 있기 때문에 5mm 이하, 2.5mm 이하, 1.2mm 이하 및 0.3mm ~ 5mm의 4종류로 입도를 구분하고 있다. 또한 고로슬래그 잔골재는 알칼리실리카 반응에 대한 염려가 없는 것으로 제한적이지 않은 것으로 보고되고 있다.

그리고 제강슬래그는 토목용 및 도로용 골재 등으로서 재활용되고 있고, 사용자 측에서도 물류비 등 경제성을 고려하

여 사용하기 때문에 추후 제강슬래그 인근의 건설경기 변화 등에 따른 재활용률 하락의 우려가 있으며, 충분한 에이징 처리가 실시되지 않은 상태에서 토목용으로 사용되면, 침출수에 의해 사용처 인근 토양, 해역 또는 지하수 오염 등의 우려가 있다. 제강슬래그의 일종인 전기로산화 슬래그의 경우 고철을 전기로에서 용융시키는 과정에 부유되는 부산물을 말한다. 전기로의 특징은 경로 내의 분위기를 산화성, 환원성으로 변화시키기 때문에 발생하는 슬래그도 산화 슬래그, 환원 슬래그가 발생되며, 전기로산화 슬래그는 밀도가 높고 슬래그 자체의 경도도 높기 때문에 콘크리트용 골재로서 활용이 가능하지만, 전기로환원 슬래그는 물을 만나면 팽창반응성을 갖고 있는 미반응 유리석회(F-CaO)의 함량이 높고 슬래그 자체의 강도도 매우 낮기 때문에 콘크리트용 골재로서의 활용이 불가능한 것으로 보고 되고 있으나 최근에는 팽창현상을 이용한 기술개발이 이루어지고 있다.¹⁴⁾

페로니켈슬래그는 스테인리스강의 주원료인 페로니켈을 제조하는 과정에서 발생하는 용융 슬래그로서, 철과 니켈을 혼합 용해 및 제련 과정에서 발생하는 부유물이며, 냉각 방법에 따라 급냉 및 서냉 슬래그로 구분된다. 서냉 슬래그는 입자 크기가 굵기 때문에 노반재로 주로 사용되며, 급냉 슬래그의 경우에는 골재의 입자 크기가 작아 최근 콘크리트용 잔골재로서 활용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.¹⁵⁾

이 외에도 기타 슬래그 골재로는 동슬래그 골재, 연슬래그 골재 등이 있으며, 화학적 안정성 및 유해 물질 용출 기준 등의 제한으로 인해 사용 실적이 많지 않은 실정이다.



그림 6. 제조 공정별 페로니켈슬래그 잔골재의 제조공정

입도에 의해 구분된 페로니켈슬래그 잔골재를 콘크리트의 잔골재 단독으로 사용할 수 있으며, 일반적인 천연잔골재와 혼합하여 입도의 조정이나 그 외의 목적으로 사용할 수 있기에 KS F 2527 표준에서는 혼합해서 사용하는 경의 방법도 고려하여 입도 범위에 따라 FNS 5, FNS 2.5, FNS 1.2, FNS 5-0.3의 4가지 입도 분포를 규정하여 적용하도록 규정하고 있다.

페로니켈슬래그 골재는 합금철인 페로니켈을 제조할 당시에 발생되어 대부분이 폐기되어지고 있으며, 페로니켈 제련소에서 니켈을 제련할 경우 원료 및 제선, 제강 등에 의한 복잡한 생산라인을 거치면서 원료 품위가 낮아 생산량의 약 30배에 달하는 입경 8-13mm의 페로니켈슬래그 골재가 부산물로 발생하게 된다.

페로니켈슬래그 골재는 산화마그네슘(MgO) 약 32% 내지 37%와 이산화규소(SiO₂) 약 55% 내지 60%의 주성분과 산화알루미늄(Al₂O₃), 산화철(Fe₂O₃), 산화칼슘(CaO) 등이 소량 함유되어져 있다.

통상적으로 부산물인 페로니켈슬래그 골재는 일본 및 캐나다와 같이 국외 선진국에서는 페로니켈슬래그가 콘크리트용 잔골재, 토목용 재료, 시멘트제조용 원료, 활주로용 골재, 기타 대체재 등으로 다양하게 재활용되고 있다. 그러나 국내의 경우 제철소의 부산물인 페로니켈슬래그 골재가 가진 물성의 특성상 기존의 파쇄장치(천연골재의 파쇄장치)로는 대량으로 연속적 5 mm이하로 파쇄하여 가공하는 기술적 설비의 구축이 되지 않음으로 인하여 상용에 한계를 가질 수밖에 없는 문제점이 있었다.

특히 각 지역별로 혼합되는 콘크리트용 잔골재의 입도나 입형이 상이하여 현실적으로 페로니켈슬래그 잔골재의 조립률은 3.5 mm이하로 낮추기 어려운 기술적 한계하에서는 전체 잔골재 대비 20% 이상의 배합률을 맞추기 어려운 실정이다.

4. 맺음말

본 기사에서는 산업부산물 발생현황과 더불어 골재로 활용한 폐차원에 대한 연구 사례를 통해 산업부산물 골재 재활용에 대한 기대효과와 문제는 다음으로 요약할 수 있다.

1) 먼저, 산업부산물을 골재를 고부가가치화하여 재활용하

기 위해서는 산업부산물이 가지는 유해성이나 기능성 부여 및 개선뿐만 아니라 산업부산물에 대한 인식 제고가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

- 2) 이에 따라 국내에서는 산업부산물에 대한 신뢰성 및 인식을 향상시키기 위해 활용타당성 및 안전성 검증을 위해 지속적인 노력이 필요하며, 이를 기반으로 사회적 인식 개선이 필수적이다.
- 3) 또한 산업부산물을 골재로서 재활용하기 위해서는 지정부산물 지정 및 재활용 허가·규제 완화 등 정책적인 개선이 필요하며, 재활용 공정 구축을 위한 정부 차원에서 다양한 지원이 요구된다.
- 4) 이러한 점을 감안하여 자원순환 및 재활용을 위하여 문제점을 보완한 적극적인 연구 및 제도적 뒷받침이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Baoyu, L., L. Guoxing, W. Guiyu, Z. Guofeng, and Y. Man, (2022). "Research on CART model of mass concrete temperature prediction based on big data processing technology", IEEE Access 10.
2. El-Mir, A., J. J. Assaad, S. G. Nehme, and H. El-Hassan, (2022). "Correlating strength and durability to timetemperature profiles of high-performance mass concrete", Case Studies in Construction Materials 16.
3. 이화춘, 박종원, (2017). "바다골재 채취와 해양환경 보호문제", 충남대학교 법학연구소, Vol. 28, No. 3, pp. 145~177.
4. 국토교통부, (2022). 2023년도 골재수급계획
5. 환경부, (2021). 2021년 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
6. 한국철강협회, (2021-2022). 철강슬래그 재활용 실적 및 계획.
7. International Solid Waste Association (ISWA) (2015). Bottom Ash from WtE Plants Metal Recovery and Utilization
8. 한국환경산업기술원 (2016). 건식공정 바텀애시를 이용한 친환경 저밀도 건설용 소재 개발. <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700005468> 에서 검색
9. 조병완, 방승국, 권병운 (2004). 알칼리 활성화 석탄회(Fly ash, Bottom Ash) 인공경량골재 및 콘크리트 적용, 콘크리트학회 논문집, 16(6), 751-757.
10. 박승호 (2018). "콘크리트용 잔골재 및 결합재료 활용하기 위한 바텀애시의 성능 개선", 박사학위논문, 대전대학교 대학원.
11. 최홍범, 김진만 (2018). 건식 바텀애시 경량 잔골재와 소성 인공경량 굽은골재를 사용한 콘크리트의 기초 특성, 한국건설순환자원학회논문집, 6(4), 267-274.
12. 정장희 (2001). Bottom Ash를 골재로 이용한 보차도용 인터로킹 블록의 물성에 관한 연구, 석사학위논문, 중앙대학교 건설대학원.
13. 이병재 (2011). "복합슬래그골재를 활용한 연안해역 복원용 친환경콘크리트의 공학적 특성 및 성능향상에 관한 연구", 박사학위논문, 충남대학교 대학원.
14. 최성우, 김정식, 전준영, 김은경, 류득현 (2008). "전기슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 기초물성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집.
15. 강이름 (2019). "콘크리트용 FNS용 잔골재의 품질향상을 위한 공정설계에 관한 연구", 석사학위논문, 동아대학교 대학원.

담당 편집위원 : 이승정(인천대학교)