

철강산업 부산자원 현황 및 활용 현황

Current Status and Recycling of By-Product from Steel Industry



이방연 Bang-Yeon, Lee
전남대학교 건축학부 조교수
E-mail : bylee@jnu.ac.kr

1. 서론

철강산업은 철을 함유하고 있는 철광석, 철스크랩 등을 녹여 쇳물을 만드는 제선과 제강 공정, 연주 및 압연과정을 거쳐 최종 철강제품을 만들어내는 산업이다. 특히 선철을 만들어내는 고로와 제강을 만들어내는 전로와 전기로에서는 철광석에 함유되어 있는 불순물을 제거하고 탄소의 양을 줄이는 과정에서 부산물로서 다량의 슬래그가 발생한다. 월드스틸과 한국철강협회에 따르면 2013년을 기준으로 우리나라에서 생산된 조강은 약 6,600만 톤으로 세계에서 6위를 차지하고 있으며, 2014년 7월 한 달간 국민 1인당 철강재 생산량(약 120kg/인)은 세계 1위를 기록하고 있다. [표 1]^{1), 2)} 이와 함께 철강산업에서 발생하는 슬래그 양은 2013년을 기준으로 2,400만 톤에 달하고 있다. 철강산업에서 발생하는 슬래그는 시멘트의 주 성분인 산화칼슘과 이산화규소를 다량 함유하고 있어, 잠재수경성을 갖고 있기 때문에 슬래그 시멘트와 같은 형태로 건설재료로 많은 양이 활용되고 있지만 각 공정별로 사용되는 원재료도 다르고 처리 방법에 따라 성질이 달라지기 때문에 효율적으로 사용하기 위해서는 슬래그의 발생 과정, 특성 및 처리 방법에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이에 본 고에서는 철강산업에서 발생하는 부산자원인 슬래그의 특징, 발생 및 활용 현황에 대해 기술하고자 한다.

[표 1] 2014년 7월 세계 주요나라 조강 생산량

| | 중국 | 일본 | US | 인도 | 러시아 | 한국 | 독일 | 브라질 | 터키 | 우크라이나 | UK |
|--------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 생산량(Mt*) | 68.3 | 9.3 | 7.6 | 7.0 | 6.2 | 5.9 | 3.4 | 2.9 | 2.8 | 2.5 | 1.0 |
| 인구(백만) | 1355.7 | 127.1 | 318.9 | 1236.3 | 142.5 | 49.0 | 81.0 | 202.7 | 81.7 | 44.3 | 63.7 |
| 인당 생산량(kg/인) | 50.4 | 73.2 | 23.8 | 5.7 | 43.5 | 120.4 | 42.0 | 14.3 | 34.3 | 56.4 | 15.7 |

* Million ton

1) <http://www.worldsteel.org>, Worldsteel, 2014

2) <http://www.kosa.or.kr>, 한국철강협회, 2014

2. 철강산업 부산자원

2.1 철강산업 부산자원의 종류

전술한 바와 같이 철강 슬래그는 발생 과정 및 처리 방법에 따라 다양하며, 그 특성 또한 다르다. 대표적으로 고로 슬래그는 철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하는 고로에서 선철을 제조하는 공정에서 발생되며, 발생 슬래그의 냉각방식에 따라 급랭 수쇄 슬래그와 서랭 슬래그로 구분된다.

제강 슬래그는 선철 또는 고철을 사용한 제강 공정에서 발생하는 슬래그로서 고로에서 제조된 선철을 주원료로 사용하는 전로 슬래그와 일반 고철을 주원료로 사용하는 전기로 슬래그로 구분된다.

특히 전기로 슬래그는 정련공정에 따라서 산화 정련할 때 발생하는 산화 슬래그와 환원 정련할 때 발생하는 환원 슬래그로 구분할 수 있다.

이외에 탈탄 슬래그, 탈인 슬래그, 탈황 슬래그, 예비처리 슬래그 등이 있으며, 합금강 및 합금강에 필요한 원료를 생산하는 과정에서 발생하는 페로니켈 슬래그, 스테인리스강 슬래그, 실리콘망간 슬래그 등도 있다. [표

2]에 대표적인 철강산업 부산자원의 종류, 발생 과정을 정리하였다.

2.2 철강산업 부산자원의 특징

슬래그의 특징은 화학 조성과 냉각 방법에 따라 결정된다. [표 3]은 슬래그 종류에 따른 화학 조성을 나타낸다. 대부분 이산화규소, 산화칼슘, 산화알루미늄이 주요 성분을 구성하고 있으나 원재료에 따라서는 페로니켈 슬래그나 실리콘망간 슬래그와 같이 산화마그네슘이나 산화망간이 다량 함유되어 있는 경우도 있다.

냉각 방법에 따라서는 공기 중에서 서서히 냉각시키는 서랭법과 고압의 냉각수를 이용하여 급랭시키는 급랭법이 있다. 일반적으로 서랭 슬래그는 냉각속도가 느리기 때문에 결정질 조직이 안정화되어 있고 조립한 입형 특성을 갖게 되어 반응성이 떨어진다.

특히 제강 슬래그의 경우 현재 대부분 서냉되어 배출되고 있는데 유리석회(free-CaO)의 팽창 문제로 인하여 1개월에서 최대 3개월 이상의 에이징(aging)을 하고 있다. 이러한 기존 슬래그 재활용 방법은 오랜 시간과 넓은 야적장의 요구, 고알칼리 침출수 및 비산 먼지 등과 같은 환

[표 2] 철강산업 부산자원의 종류 및 발생 과정

| 종류 | 발생 과정 | 발생량 |
|------------|--|--------------------------------------|
| 고로 슬래그 | 철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하는 고로(용광로)에서 선철을 제조하는 공정에서 발생 | 약 1,400만 톤* |
| 전로 슬래그 | 고로에서 제조된 선철을 주원료로 전로에서 정련과정 중에 발생 | |
| 전기로 | 산화 슬래그 | 일반 고철을 주원료로 전기로에서 산화 정련(1차 정련)할 때 발생 |
| | 환원 슬래그 | 일반 고철을 주원료로 전기로에서 환원 정련(2차 정련)할 때 발생 |
| 페로니켈 슬래그 | 스테인레스의 주원료인 페로니켈을 전기로 또는 로터리 킬른에서 제련하여 생산할 때 마그네슘의 함유량이 높은 페로니켈 슬래그 발생 | 약 100만 톤** |
| 스테인리스강 슬래그 | 스테인리스강을 생산할 때 발생 | |
| 실리콘망간 슬래그 | 합금강에 사용되는 실리콘망간을 생산할 때 발생 | |

* 2013년³⁾

** 2008년⁴⁾

3) <http://www.kosa.or.kr>, 한국철강협회, 2014

4) 박만석, 수쇄 페로니켈슬래그 잔골재 콘크리트의 품질특성에 관한 연구, 세명대학교 석사학위논문, 2011

[표 3] 철강 슬래그 종류에 따른 화학 조성 비교 예

| 종류 | 화학 조성(%) | | | | | | | | | |
|------------|------------------|------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------|------------------|-------|------|
| | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | T-Fe* | MgO | SO ₃ | MnO | TiO ₂ | Sum | |
| 고로 슬래그 | 33.8 | 42.0 | 14.4 | 0.3 | 6.7 | 0.84 | 0.3 | 1.0 | 99.34 | |
| 전로 슬래그 | 13.8 | 44.3 | 1.5 | 17.5 | 6.4 | 0.1 | 5.3 | 1.5 | 90.4 | |
| 전기로 | 산화 슬래그 | 17.7 | 26.2 | 12.2 | 21.2 | 5.3 | 0.1 | 7.9 | 0.7 | 91.3 |
| | 환원 슬래그 | 27.0 | 51.0 | 9.0 | 1.5 | 7.0 | 0.5 | 1.0 | 0.7 | 97.7 |
| 페로니켈 슬래그 | 53.5 | 0.7 | 1.5 | 4.5 | 35.5 | - | - | - | 95.7 | |
| 스테인리스강 슬래그 | 28.0 | 34.7 | 6.6 | 20.0 | 6.0 | - | - | - | 95.3 | |
| 실리콘망간 슬래그 | 36.0 | 18.0 | 18.0 | - | 6.0 | - | 19.0 | - | 97.0 | |
| 포틀랜드 시멘트 | 22.0 | 64.2 | 5.5 | 3.0 | 1.5 | 2.0 | - | - | 98.2 | |

*주) FeO와 Fe₂O₃의 합량

경문제가 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하고자 개발된 새로운 방법 중 실용화 된 것이 아토마이징(Atomizing)에 의한 공기급랭처리 기술이다.⁵⁾ 이 기술로 처리된 급랭 슬래그는 냉각속도가 빠르기 때문에 결정질을 형성하지 않고 유리질상(비정질상)을 가진다. 모래와 유사한 입상으로 배출되므로 슬래그의 조성에 따라 체분리하여 구형 골재로 사용하거나 분쇄하여 수경성 결합재로 사용된다.

2.3 철강산업 부산자원의 재활용 현황 및 용도

[표 4]는 발생량이 많은 고로 슬래그와 제강 슬래그의 활용 현황을 나타낸다. 잠재수경성과 치수안정성이 높은 고로 슬래그는 시멘트 원료 및 콘크리트용 혼화재 등으로 활용되고 있으며, 서랭 슬래그는 도로용 골재 또는 성토용 골재로서 활용되고 있다.

고로 슬래그 골재를 잔골재로 사용할 경우 급랭 슬래그를 입도 조정하여 사용하고 있으며, 굵은 골재로 사용할 경우에는 서랭 슬래그를 파쇄 및 분급하여 활용하고 있다. 냉각과정에서 유리화되어 팽창 반응성이 높은 유리석회화 생성되기 때문에 냉각되어 배출된 전로 및 전기

[표 4] 철강 슬래그 재활용 현황(2013년 기준)

| 용도 | 고로 슬래그 | | 제강(전로+전기로) 슬래그 | |
|-----|-------------|-----------|----------------|-----------|
| | 사용량 (만톤) | 비율 (%) | 사용량 (천톤) | 비율 (%) |
| 시멘트 | 1,129 | 81.5 | 41 | 4.0 |
| 도로용 | 70 | 5.1 | 267 | 26.2 |
| 성토용 | 126 | 9.1 | 473 | 46.3 |
| 비료 | 36 | 2.6 | - | - |
| 잡석용 | - | - | 5 | 0.5 |
| 재사용 | - | - | 135 | 13.2 |
| 벽돌용 | - | - | 52 | 5.1 |
| 기타 | 24 | 1.7 | 48 | 4.7 |
| 합계 | 1,385 | 100.0 | 1,021 | 100.0 |

로 환원 슬래그는 높은 팽창 반응성을 갖고 있어서 활용 범위는 매우 제한적인 반면, 전기로 산화 슬래그는 유리석회 및 유리마그네슘의 함량이 매우 적어 콘크리트용 원자재로서 활용 가능성이 높으며, 특히 골재 자원으로 활용이 높을 것으로 기대되지만 현재까지 대부분 도로용 및 성토용으로 활용되고 있는 실정이다.

또한 아직까지 국내 전기로 생산업체의 슬래그 반출 공정에서 산화 슬래그와 환원 슬래그를 구분하여 반출하지 않고 있기 때문에 유리석회 등의 함유량 제어가 불명확하여 콘크리트용 원자재로서 사용하기에는 부적합하다. 그러므로 전기로 슬래그를 콘크리트용 재료로 사용하기 위해서는 분리배출이 선결과제라고 할 수 있다.

5) 김진만 외, "아토마이징 공정에 의한 급랭 제강슬래그의 특성, 콘크리트학회지, 제 19권 6호, 2007, pp. 39~45.

[표 5] 철강산업 부산자원의 종류 및 발생 과정

| 종류 | | 관련 규격 |
|------------|--------|--|
| 고로 슬래그 | | KS F 2563 : 2009 콘크리트용 고로 슬래그 미분말 KS L 5210 : 2013 고로 슬래그 시멘트 KS F 2544 : 2002 콘크리트용 고로 슬래그 골재 |
| 전로 슬래그 | | 미제정 |
| 전기로 | 산화 슬래그 | KS F 4571:2011 콘크리트용 전기로 산화 슬래그 골재 |
| | 환원 슬래그 | 미제정 |
| 페로니켈 슬래그 | | KS F 2970:2009 콘크리트용 페로니켈 슬래그 잔골재 |
| 스테인리스강 슬래그 | | 미제정 |
| 실리콘망간 슬래그 | | 미제정 |

2.4 관련 규격

[표 5]는 철강 슬래그에 대한 KS 제정 내역을 나타낸다. 생산량과 화학적 안정성이 높은 고로 슬래그, 전기로 산화 슬래그 및 페로니켈 슬래그는 제정되어 있는 반면 아직까지 품질 안정성 확보가 곤란한 전로 및 전기로 환원 슬래그와 스테인리스강 및 실리콘망간 슬래그에 대해

서는 KS가 제정되어 있지 않다.

다만, 전기로 산화 슬래그 KS는 전기로 산화 슬래그 골재의 전 제조공정에 있어서 환원 슬래그가 혼입하지 않는 시스템을 갖춘 공장에서 제조된 것에 한정하고 있다.

3. 결론

철강 슬래그는 제대로 활용하지 않을 경우 폐기물로서 추가적인 비용을 유발할 뿐만 아니라 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 산업 부산물이다.

그러나 이를 부산자원으로 활용하면 경제적인 이득뿐만 아니라 시멘트 사용량 감소에 따른 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있으며, 동시에 골재 확보에 기여할 수 있다.

다만, 대부분이 시멘트 대체재로 활용되고 있는 고로 슬래그 이외에 아직까지 고부가가치의 건설재료로 활용되지 못하고 있는 기타 슬래그에 대한 활용을 높여야 하며, 이를 위해서는 슬래그의 발생 과정 및 처리 방법에 대한 연구 개발 및 과감한 투자가 동반되어야 할 것으로 생각된다.