

순환경제 실현을 위한 철강산업의 최신 3R 기술 트렌드

이종민 수석연구원, 철강연구실 (fermi@posri.re.kr)

목차

1. 순환경제와 3R 기술
2. Reduce: 에너지 저감 및 Smart factory 기술
3. Recover: 부산물 회수 및 활용 기술
4. Recycle: 철스크랩 고급화, 재활용 기술
5. 종합 및 시사점

Executive Summary

- **순환경제 실현을 위해 천연 자원을 절약하고, 환경에 미치는 영향을 줄여 친환경 산업을 구현코자 하는 사회·경제적 요구가 커지고 있음**
 - 철강산업도 혁신적이고 지속가능한 솔루션 개발을 통해 철강 제품 생산과정에서 발생하는 부산물 회수율 제고 및 품질 향상을 위해 노력하고 있으며, 3R(Reduce, Recover, Recycle) 관점에서 다양한 기술이 상용화되고 있음
 - 산업별로 상기 3R 외 Replace, Rot 등 다양한 개념들이 사용되기도 함
- **Reduce 관점에서 철강산업은 에너지 저감 및 Smart factory 기술개발이 활발히 이루어지고 있음**
 - 철강산업은 생산과정에서 에너지 소모가 매우 큰 산업이므로 Reduce 관점에서 에너지 저감기술이 다양하게 개발되고 있으며, 특히 에너지 다소비 공정인 고로 분야에 활발하게 적용 중
 - 최근 AI 기술과 결합된 Smart factory 기술은 철강산업에서도 활발히 적용되어, 불량률 감소, 의사결정시간 단축, disuse stock 감축, 설비장애발생 감축, 사고발생건수 감소, 이상대응시간 단축 등의 효과를 기대할 수 있음
- **Recover 관점에서 대표적인 기술은 Dust에서 아연 및 철을 회수하는 기술 등이며 슬래그 및 부생가스 등이 재사용되고 있음**
 - 철강생산 과정에서 발생하는 대표적인 부산물인 고로 슬래그는 시멘트 및 비료의 원료, 제강 슬래그는 골재로 사용되고 있음
- **Recycle 관점에서 가장 활발한 기술개발이 이루어지는 분야는 철스크랩임**
 - 탄소중립 이슈 대응을 위해 철스크랩 사용량이 증가할 것으로 예상되는 바, 생산제품의 품질 제약을 극복하기 위한 Tramp element(순환성 원소)를 제어하는 기술개발이 활발히 이루어지고 있음
 - 철스크랩 검수 목적의 AI 시스템 도입뿐만 아니라 드론, 협동로봇, 블록체인 등 다양한 기술이 철스크랩 산업 고급화를 위해 개발되고 있음
- **철강산업의 3R 기술은 지속가능성과 환경보호를 위해 매우 중요한 역할을 수행하고 있음**
 - 탄소중립 이슈와 맞물려 최근 철스크랩 관련 기술개발이 활발하게 진행되고 있으며, 3R 기술개발을 통해 철강산업의 순환경제 모델이 보다 고도화될 전망이다

1. 순환경제와 3R 기술

□ 천연 자원을 절약하고 환경에 미치는 영향을 줄임으로써 친환경 산업을 구현코자 하는 사회·경제적 요구가 커지고 있음

- 3R 캠페인으로 불리는 환경 운동은 2008년 영국 웨일스에서 시작되어, 쓰레기를 줄이고, 버릴 물건을 다시 사용하고, 재활용 제품을 적극 사용하자는 취지에서 Reduce, Reuse, Recycle 개념으로 시작됨
 - 상기 3R에 새로운 개념인 Recover, Replace, Rot 등을 추가하여 4R을 구분하는 경우도 있으나 기존 3R과 명확한 구분이 어렵거나, 산업에 따라 적용하기 어려운 상황도 발생
 - Rot: 플라스틱 제품을 예로 들어 제품이 잘 썩도록 만드는 기술을 개발함으로써 환경 피해를 최소화하는 것
 - Replace: 환경오염 및 인체에 유해한 물질을 새로운 것으로 대체하는 것
- 철강산업에서도 혁신적이고 지속가능한 솔루션 개발을 통해 철강 제품 생산과정에서 발생하는 부산물 회수율 제고 및 품질 향상을 위해 노력하고 있음
 - 탄소중립 및 순환경제에 대한 다양한 요구를 충족하기 위해서는 부산물, 폐기물 관련 원재료 및 비용을 절감한 철강 생산이 이루어져야 함
 - 글로벌 철강산업은 점점 더 엄격해지는 환경 규제와 높아지는 폐기 비용 등을 고려해 재활용 개선 노력을 강화하고 있음

□ 순환경제 실현을 위해서 3R 관점 기술개발이 이루어 지고 있음

- 철강산업에서 사용되는 3R 기술은 ‘Reduce(감소)’, ‘Recover(회수)’, ‘Recycle(재활용)’로 구분할 수 있음
 - Reduce: 철강제품 생산 과정에서 소모되는 에너지와 원료의 사용량을 감축하는 기술로, 효율적인 제품 설계, 생산공정의 최적화, 에너지 효율성 향상기술 등이 해당
 - Recover: 생산과정에서 발생하는 부산물이나 폐기물을 회수하여 재사용하거나 다른 용도로 사용하는 기술
 - Recycle: 사용된 제품이나 원자재를 분해하여 재사용 또는 다른 용도로

사용하는 기술

2. Reduce: 에너지 저감 및 Smart factory 기술

□ 철강산업은 에너지 소비가 높은 제조업이라 ‘Reduce’ 관점에서 에너지 소비 축소 노력을 하고 있으며, 특히 철강 제조 프로세스 중 에너지 사용 비중이 가장 높은 고로(Blast furnace) 공정을 중심으로 다양한 기술이 개발되고 있음

○ Hot Oxygen Injection 기술

- 미국 DOE(Department of Energy) 등에서 주도하고 있는 Hot Oxygen Injection 기술은 현재 Pilot 수준의 기술 진척을 보이고 있음
- 고로에 고온 산소를 주입함으로써 기존 고로 대비 생산성을 15% 증가시키는 기술로, 단위 에너지당 철강 생산량을 극대화하는 기술

○ Blast Furnace Heat Recuperation 기술

- 1980년대부터 연구가 시작되어 Demo plant 수준까지 기술이 개발된 상태. 통상적인 Blast furnace의 배출가스 온도는 약 120℃ 수준인데, 이를 Burner에 다시 재활용하여 고로의 연소가스를 미리 예열하는 데 사용. 이를 통해 연료비를 절감하는 동시에 연소 효율을 상승시키는 기술
- 실질적인 효율 상승은 Blast Furnace 사이즈에 따라 차이가 나는 것으로 알려지고 있음

○ Plasma Blast Furnace 기술

- 화학·금속산업에서 광범위하게 사용되는 Plasma를 고로 공정에 이용하여 Metal Loss를 최소화하는 기술
- 유럽 철강협회 등의 주도로 개발되어 현재 타당성을 검토하는 수준까지 이루어짐

□ ‘Reduce’ 관점에서 최근 새롭고 활발하게 적용되는 기술은 Smart factory 기술로, 다양한 경로를 통한 철강제품 제조 시 수율 향상으로 원자재, 에너지 절감 등의 효과를 꾀할 수 있음

○ 4차 산업혁명의 핵심인 Smart factory 기술은 IoT, Big Data, AI 등 진화된

ICT 기술을 활용한 제조업의 Digitalization이며, 과거 산업혁명과 달리 한번에 이루어지는 revolution이라기보다는 단계별로 이루어지는 evolution이라는 특징을 지님

- 철강산업 생산공정에서의 자동화는 많은 진척이 이루어진 상태
- 향후 Smart 제철소는 IoT 기술을 활용하여 제철소의 데이터들을 On-site에 수집하고(smart sensing), big data에 기반하여 분석과 예측을 수행하며(smart analytics), AI를 통한 optimization 및 전체 프로세스의 자동 컨트롤(smart control)을 하게 될 전망

○ **철강산업의 Smart화는 Advanced Factory Automation, Smart Manufacturing System, Internalization of Know-How라는 세 가지 측면에서 효과적일 가능성이 높음**

- 첫째, Advanced Factory Automation은 센서를 이용한 온도측정을 포함한 Wireless Measurement 및 Monitoring, 로봇 등을 이용한 Scarfing, 위치인식 센서와 SW를 활용한 크레인 등의 무인화를 의미
- 둘째, Smart Manufacturing System은 Big data 분석에 의한 제품 불량 및 설비 고장 사전 예측, AI를 활용한 효과적인 생산 scheduling, IoT를 통한 제철소 내 다양한 설비와 시스템의 통합을 실현
- 셋째, Internalization of Know-How는 know-how성 암묵 지식을 형식지로 나타내, Smart workplace 구현을 통해 일하는 방식을 개선

○ **궁극적으로 Smart Factory 구현을 통해 불량률 감소, 의사결정시간 단축, disuse stock 감축, 설비장애발생 감축, 사고발생건수 감소, 이상대응시간 단축 등의 효과를 기대할 수 있음**

스마트 팩토리 기술을 활용한 POSCO 사례

- (제강공정) 용선의 온도, 성분, 원료가 달라도 조건에 맞춰 AI가 학습하도록 설계
→ 온도 적중률 90%, 원료사용량 60% 감축



- (연주공정) 품질 이상에 대한 기준을 AI에 적용하여 결함이 있는 소재만 선별 및 원인 분석 → 연간 6억 원의 원가 절감

- 기존에는 수많은 소재 중에서 대표소재만 의무적으로 100% 표면 검사 후, 이상 발생 시 모든 소재 대상으로 검사를 확대하여 결함 제거



- (도금공정) 딥러닝을 이용하여 제품의 강종·두께·폭·조업조건과 목표 도금량을 스스로 학습하여 정확하게 제어

- 이로 인해 기존 도금 제어 적중률이 89%에서 99% 이상으로 상향



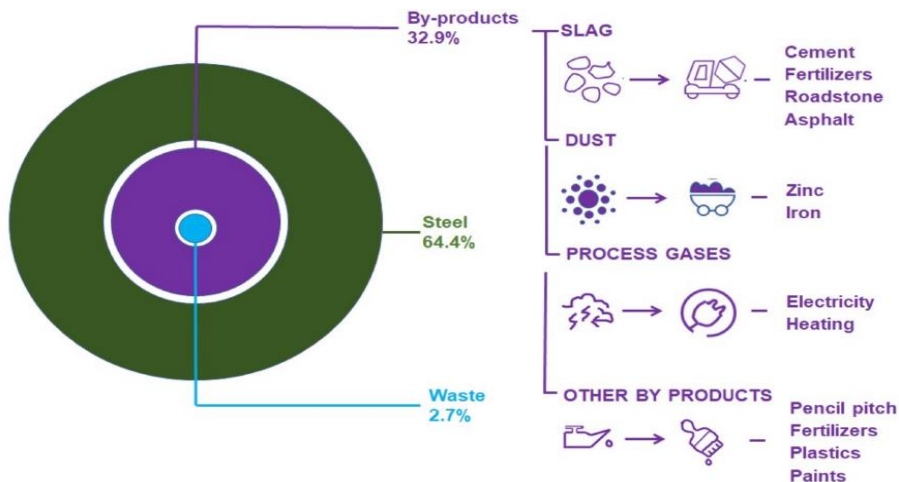
자료: 한국철강협회 재료산업인적자원개발위원회

3. Recover: 부산물 회수 및 활용 기술

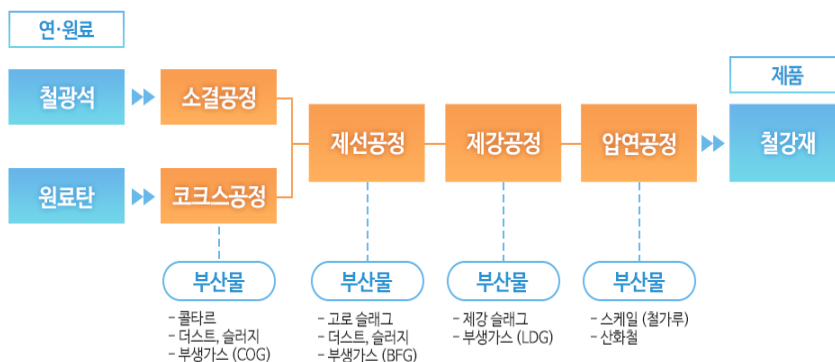
□ ‘Recover’ 관점에서 글로벌 철강산업은 지난 수십 년 동안 제철 및 제강 부산물 회수 및 사용을 위해 끊임없이 노력해 왔으며, 이에 따라 전 세계적으로 97.3%라는 효율성을 나타내고 있음

- 철강생산 시 발생하는 철강제품, 부산물, 폐기물 비율은 각각 64.4%, 32.9%, 2.7% 수준임
 - 대표적인 철강 생산과정에서의 부산물인 슬래그(Slag)는 시멘트·비료산업의 원료로 사용되거나, Roadstone 및 아스팔트 등에 사용됨
 - Dust(분진) 등에서는 아연(Zinc) 및 철(iron) 성분을 회수하고 있음

【글로벌 철강산업의 부산물 및 폐기물 현황】



〈철강 생산공정의 Input과 Output〉



자료: Branca, T.A.외(上) 및 POSCO 홈페이지(下)

□ **현재, 제강 및 전기로 Dust로부터 아연을 회수하는 기술은 다양한 방법으로 기술이 발전하고 있음**

- Dust상의 아연은 60% 정도가 Franklinter¹ 형태로 존재하는데, 아연 회수를 위해 초음파를 이용하는 침출 프로세스 기술개발 및 코팅된 철스크랩을 전처리한 후 아연을 회수하는 기술도 연구되고 있음
 - 이와 함께 부산물로부터 유가금속 회수 및 선택적 침출 공정 연구가 진행되고 있으며, 전기로 2차 제강에서 순수 아연 화합물이나 금속 아연을 재생하는 기술이 개발되어 적용되고 있음

□ **철강제품 생산 시 발생하는 부산물 중 가장 대표적인 슬래그는 매년 4억 톤 이상 발생함**

- **고로 슬래그는 시멘트 및 비료의 원료로 사용**
 - 철광석으로부터 철을 분리하고 남은 물질인 슬래그는 어디에서 발생했는지에 따라 고로슬래그와 제강슬래그로 구분됨
 - 고로 슬래그는 고로가 쇳물을 만드는 과정에서 발생한 암석 성분의 뜨거운 용융슬래그로, 이를 밀폐된 설비에서 고압의 물을 분사해 급속 냉각시켜 제조하면 모래 형상의 수재슬래그가 되고, 야드에서 서서히 냉각시키면 괴재 슬래그가 됨
 - 제강슬래그는 고로슬래그와 마찬가지로 전로나 전기로 등에서 쇳물을 정련하여 강을 만들 때 발생
 - 고로 수재슬래그는 석회석을 대신하여 친환경 시멘트를 만들 수 있음. 시멘트의 주원료이자 천연자원인 석회석 대신 슬래그 사용 비율을 높이면 석회석 사용량을 45%가량 절감할 수 있고, 시멘트가 물과 결합할 때 발생하는 수화열(水和熱)을 낮춰 콘크리트 균열을 줄일 수 있어 내구성과 강도를 높임
 - 수재슬래그의 친환경적인 활용 방법은 바로 '규산질 슬래그 비료'로, 이

¹ 철(Fe) 계열에 속하는 산화물로 화학식은 ZnFe₂O₄

슬래그를 분쇄하여 비료로 만들면 벼가 튼튼해지고 토양의 산성화를 막을 수 있음

○ **괴재 슬래그 및 제강 슬래그는 토목용 골재로 사용**

- 건설공사에는 산이나 강에서 얻은 자갈이나 모래와 같은 천연 골재가 많이 사용되는데, 천연 골재와 특성이 비슷한 슬래그 골재를 사용하면 석산(石山) 개발을 억제하고 골재 채취·가공 공정 등에 따른 에너지 절약이 가능함

□ **부생가스는 99% 회수되어 재이용하거나 발전시설의 전력 생산에 사용**

○ **코크스 오븐의 COG(Coke Oven Gas), 고로의 BFG(Blast Furnace Gas), 전로의 LDG(Linz-Donawitz converter Gas)와 같은 부생가스에는 메탄(CH₄), 일산화탄소(CO) 등의 성분이 포함되어 있음**

- 해당 부생가스는 연료로 사용하기에 충분한 에너지를 보유하고 있으므로 재사용이 가능. 발전소에서 가스압축기로 부생가스를 압축하여 가스터빈에서 1차 전력을 생산한 후, 배출된 고온의 배기가스를 회수하여 스팀터빈에서 2차 전력을 생산함

4. Recycle: **철스크랩 고급화, 재활용 기술**

□ **철스크랩은 전기로 제강의 주요 원료로 사용되고 있으며, 고로 프로세스에서도 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 저HMR² 조업을 수행함에 따라 관련 재활용 기술이 집중적으로 개발되고 있음**

○ **Tramp element(순환성 원소) 제거 기술**

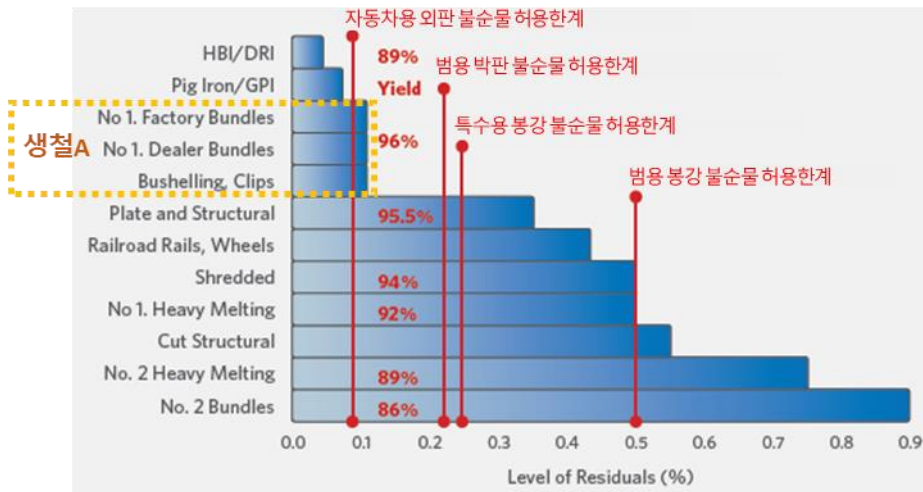
- 철스크랩은 이산화탄소 배출량 감소 및 자원 재활용 측면의 여러 장점이 있으나, 철스크랩으로 철강제품 제조 시 제강 프로세스에서 제거하기 어려운 구리(Cu)나 주석(Sn)과 같은 Tramp element(순환성 원소) 등의 문제로 고순도 제품을 생산하기 어려운 단점이 있음
- 이에, 전기로 공정에서 구리와 주석 등을 효과적으로 제거하는 기술에

² 제강 공정에서 hot metal 비중을 낮추고 철스크랩 비중을 늘리는 조업

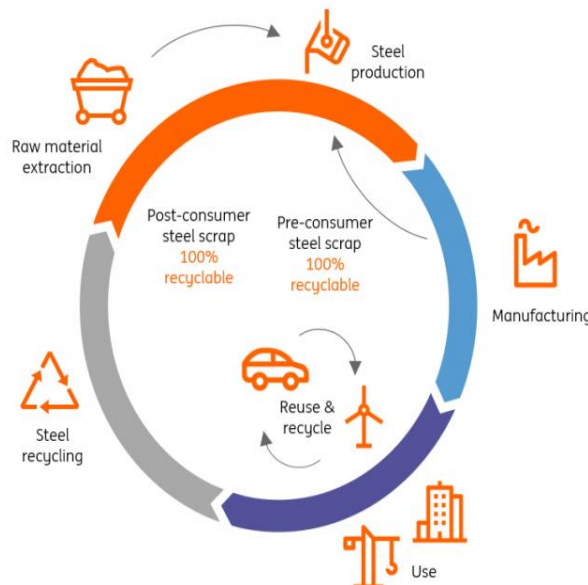
초점을 맞추어 연구개발이 진행될 것으로 예상되며, 구리의 경우 ‘저온 슈레더(shredder)법, 알루미늄 용액 침적법 및 아민 이온을 함유한 암모니아 용액으로 구리를 분리하는 습식 기술 등이 제안되고 있음

- 주석 제거에도 물리적, 화학적 방법 등이 시도되고 있음
- 하지만, 철스크랩에 함유된 Tramp element 제거 기술은 대부분 연구단계에 있고 경제성과 기술성에서 많은 문제를 내포하고 있기 때문에 실용화되기 위해서는 장기적인 연구개발이 요구되는 실정임

【철원별 불순물 농도와 철강제품 생산 강종과의 관계】



【철강제품의 Life cycle】



자료: worldsteel, ING research

□ AI를 이용한 철스크랩 화상 검수 시스템 개발

○ 철스크랩의 재활용 효과를 대폭 올리기 위해 AI 시스템을 적용한 화상 검수 자동화를 추진하고 있음

- 철스크랩은 재활용하기 전에 경량, 중량, 생철 등의 등급으로 분류하고, 불순물 함량 정도를 분석하는 과정을 거치는데 지금까지는 현장 작업자들의 육안에 의존해 왔음
- 이로 인해 판별 오류 및 안정성 문제가 항상 제기되었는데, AI를 통한 화상 검수 시스템은 데이터를 기반으로 철스크랩 등급 비율, 품질 등을 자동으로 분류함으로써 검수, 판별 정확도 증가뿐만 아니라 비용 절감 효과까지 얻을 수 있음

○ 2~3년 전부터 일본 및 중국 등에서 경쟁적으로 기술개발 중이며, 국내는 철스크랩 분류 시스템 개발 실증 단계에 있음

- 국내 수준은 아직 업계에 보편적으로 적용되지는 않았지만 실증 단계까지 올라온 상황임
- 철스크랩이 상차 또는 하차하는 장면을 학습된 인공지능이 카메라로 촬영해 철스크랩 등급을 판독하는 원리로, 향후 기술개발이 완성되면 빠르게 업계에 확산될 전망

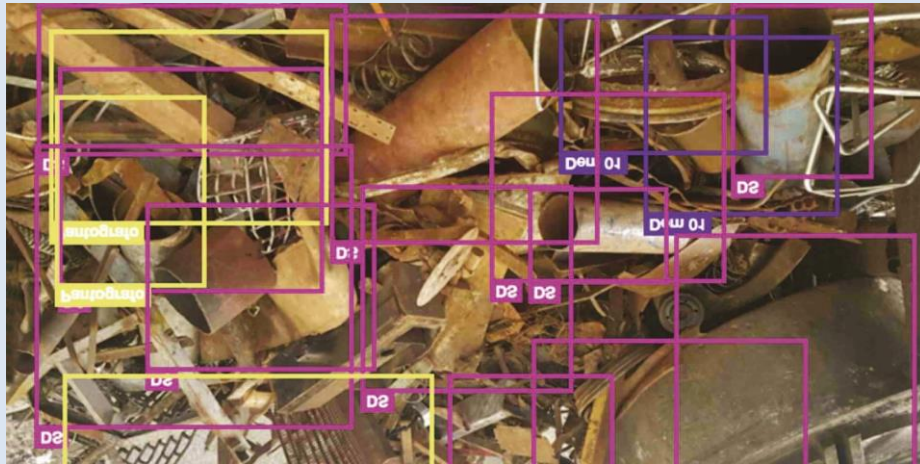
철스크랩 AI 검수시스템 기술개발 동향

□ 철스크랩 활용에서 AI 기술 등이 적용되어 철스크랩 검수 시스템에 새롭게 적용되고 있음

- '19년, 일본의 동경제철은 전기로에 공급하는 철스크랩 처리 및 선별 작업을 위해 철강설비 엔지니어링 전문업체인 Danieli社の 자동 철스크랩 분류 시스템을 도입하였음

- 동경제철은 해당 자동화 설비를 규슈 공장에 시범적으로 설치하였으며, 이를 통해 야드 운영에 대한 실시간 피드백은 물론 공급업체향 클레임에 대한 객관적인 근거를 제공할 수 있게 됨
- 또한, 동경제철의 타사업장에도 실시간 정보 제공이 가능해짐

[Danieli社 검수 시스템 철스크랩 인식 화면]



□ 우리나라의 경우, 제강사가 참여한 정부 연구과제가 진행 중

- 소프트웨어 솔루션 기업과 협업하여 철스크랩 선별 데이터 수집 기술개발이 진행 중이며, '23년 9월에 현대제철, 동국제강 등에 납품해 시스템을 설치
- 산업부는 '25년을 기점으로 시를 통한 철스크랩 검수가 국내에 본격화될 것으로 전망하고 있음

- 협동 로봇은 카메라, 로봇 팔, 그리퍼 및 컨베이어 시스템을 활용하여 필요한 철스크랩을 들어올리고 이동, 쌓기 등 다양한 업무를 처리할 수 있음
 - 협동 로봇의 도입으로 가동 중지시간을 최소화할 수 있으며, 로봇이 위험하고 제한된 공간에서 작업할 수 있어 작업자의 부상위험을 줄일 수 있음
- 블록체인 기술은 아직 철스크랩 산업에 광범위하게 적용되지는 않았지만 추적성, 투명성 및 인증과 관련된 철스크랩 산업 문제를 해결할 대안

기술로 부상하고 있음

- 블록체인을 사용하면 거래 및 운송이 기록되고 문서화됨에 따라 수집에서 처리에 이르기까지 각 단계에 대한 신뢰할 수 있는 기록이 보장됨
 - 또한, 블록체인은 재료의 원산지, 조성 및 품질 관리 데이터에 대한 정보를 저장하여 철스크랩 등급의 진위 여부를 검증할 수 있음
- 드론 기술은 철스크랩 사업장의 안정성을 높일 수 있음
 - 드론은 상공에서 실시간 감시가 가능함에 따라 철스크랩 야적장에서의 안전 문제를 사전에 해결하고, 사고 위험을 최소화할 수 있도록 지원함
 - 드론에 카메라와 센서를 장착하여 재고 관리를 혁신할 수 있는데, LiDAR(Light Detection and Ranging Technology) 기술을 사용하여 드론으로 비축물의 3D 모델을 생성하고 자재의 부피와 무게를 추정할 수 있음
 - 이 데이터는 재고 수준에 대한 통찰력을 제공하여 철스크랩 야적장의 저장 공간과 운송 계획을 최적화할 수 있음
 - 철스크랩을 녹이고 재처리할 때 이러한 재료를 필라멘트로 변환한 다음 3D 프린팅의 원료로 사용할 수 있음
 - 동 재료로 새로운 제품이나 부품을 만들 수 있어 순수 재료의 필요성을 줄이고 폐기물을 최소화할 수 있음

5. 종합 및 시사점

- 철강산업의 3R 기술은 지속가능성과 환경보호를 위해 매우 중요한 역할을 수행하고 있음
 - 탄소중립 이슈와 맞물려 철스크랩 관련 기술개발이 최근 활발하게 진행되고 있으며, 철강산업의 순환경제 모델이 3R 기술개발로 보다 고도화될 전망
- 최근, 활발한 기술개발이 이루어지는 분야는 스마트 팩토리 기술과 철스크랩 관련 분야임
 - Reduce 관점에서 스마트 팩토리 기술은 수율 향상과 에너지 소비 절감

등의 효용을 가져오며, 관련기술의 발달로 적용 분야의 폭을 지속적으로 넓히고 있음

- 철스크랩 분야는 저탄소 시대에 특히 각광받는 분야로, 재활용률 제고를 위해 철스크랩의 수집, 분류 등에 AI 및 드론기술을 적용하려는 연구개발이 이루어지고 있음. 또한, 최근 투자가 가장 활발히 이루어지는 분야임

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

[보고서/논문]

AISI & SMA, “Determination of Steel Recycling Rates in the United States”, 2021

Branca, T.A., Colla, V., Valentini, R., “A way to reduce environmental impact of ladle furnace slag”, Ironmak. Steelmak. 2009, 36, 597-602.

Branca, T.A. 외, “Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe”, Metals, 2020, 10, 345

Clare Broadvent, “Steel’s recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy”, Int J Life Cycle Assess (2016) 21:1658-1665

Hajime Omae 외, “Optimal Recycling of Steel Scrap and Alloying Elements: Input-Output based Linear Programming Method with Its Application to End-of-Life Vehicles in Japan”, Environ. Sci. Technol. 2017, 51, 13086–13094

ING Research, “Why ferrous scrap is emerging as a key strategic raw material”, 2023.11.

Worldstainless, “CO₂ emission report”

Russel Hall 외, “Domestic Scrap Steel Recycling -Economic, Environmental and Social Opportunities”, 2021

한국철강협회 재료산업인적자원개발위원회 이슈리포트, “철강산업에서의 스마트제조 혁신과 전망”, 2020.12.7

[홈페이지]

리사이클링 제품 뉴스 (Recyclingproductnews.com)

세계철강협회, (worldsteel.org)

포스코 (www.posco.co.kr)

GLE Scrap Metal (<https://glescrap.com/>)

다니엘리 (www.danieli.com)