수소 기반 환원 제철 공정과 전환 기술

이상호* · 이운재 · 이영석 · 김완호

포스코 기술연구원

Hydrogen-Based Reduction Ironmaking Process and Conversion Technology

Sang-Ho Yi*, Woon-Jae Lee, Young-Seok Lee, and Wan-Ho Kim

Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 37859, Republic of Korea

Abstract: This study analyzed the current state of technical development of the BF-based process, to determine ways to reduce carbon consumption. The technical features of the hydrogen reduction ironmaking process were also examined as a decarbonized ironmaking method, and related issues that should be considered when converting to hydrogen reduction are discussed. The coal rate consumed by the reduction reaction in the coal-based BF process should be less than 50%. The heat requirement for indirect reduction in hydrogen reduction is higher than that of CO reduction, since hydrogen reduction is endothermic. The BF-based integrated steel mill is an energy independent process, since coal is used for the reduction of iron ore and melting, and the by-product gases evolved from the BF process are utilized for reheating the furnace, the power plant, and steam production. For hydrogen reduction, only green hydrogen should be used for the reduction of iron ore, and the power required to melt the iron and for the downstream rolling process will have to be provided from the external grid. Therefore, to convert to hydrogen reduction, green power should be supplied from an external infrastructure system of the steel industry. It will be necessary to discuss an optimized pathway for the step-by-step replacement of current coal-based facilities, and to reach agreement on the socio-economic industrial transition to hydrogen reduction steel.

(Received September 14, 2020; Accepted November 16, 2020)

Keywords: ironmaking, reduction, CO₂, H₂

1. 서 론

현대화된 일관제철소는 석탄 등의 화석 원료를 이용하여 철광석 환원제 및 에너지 자원으로 운영되는 최적화된 시스템이다. 한편, 이산화탄소(CO₂)로 대표되는 온실가스 감축 노력이 전 세계적으로 진행되고 있는 가운데, 새로운 기후 체제 합의문이 2015년 파리 기후변화 협약에서 도출되었고, 국내에서도 2030년 국가 감축목표를 2017년 대비 24.4%로 결정하였다 [1]. 따라서 산업계 전반에 걸친 배출 절감을 위한 노력이 요구되고 있으며, 철강산업은 석탄을 환원제와 열원으로 사용하는 제선공정 중심의 개선 노력을 추구하고 있다. 아시아권의 철강 생산방식은 주로 석

탄을 이용한 고로기반 공정으로 전세계 철강생산량의 70% 정도를 점유하고 있다 [2]. 이 방식은 일본 철강산업이 호주 및 브라질로부터 연,원료를 대량으로 수급하고 에너지 측면에서도 최적화된 임해 일관제철소(Sea Side Integrated Steel Mill)모델로서 성공적으로 확대되어 왔다 [3]. 우리나라 철강업은 그동안 지속적인 기술개발 및 대규모의 설비 투자로 석탄 및 에너지 사용 원단위가 일본과 함께 전 세계적으로 가장 우수하여 최고의 경쟁력을 갖추고 있어, 추가 절감 여력이 크지 않은 상황이다 [4,5]. 지속적인 설비 투자와 경제적인 조업 결과, 2019년 기준 국민 1인당 철강 소비량은 1.04 톤으로 전세계적으로 압도적 1위에 이르렀고, 전방산업인 자동차, 조선, 가전산업의 경쟁력을 동반 상승시키는 산업의 쌀 공급자 역할을 하고 있다 [6]. 그러나 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 현재의 탄소기반 고로공정에서 배출되는 온실가스 감축에 대한 요구로 공정의 패러다임 전환을 위한 새로운 기술적 접근

- 이상호: 연구위원, 이운재·이영석·김완호: 연구원

*Corresponding Author: Sang-Ho Yi

[Tel: +82-54-220-0018, E-mail: yish@posco.com]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Fig. 1. Schematic diagram for overall reaction of ironmaking process.

에 대한 모색이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 국내-외 철강산업에서 수행되고 있는 CO₂ 감축을 위한 고로기반 공정의 기술개발 현황을 비교 분석하고, 탈 탄소 제철법으로 주목하고 있는 수소환원 제철 공정의 기술적 특징을 검토하여 수소환원으로 전환 시 고려해야할 과제에 대해 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 고로 환원 반응과 제선 기술 특징

철광석은 철(Fe), 산소(O₂) 및 맥석으로 구성되어 있으며, 철광석 중의 산소는 석탄연소가스인 일산화탄소(CO)와의 환원반응에 의해 제거된다. 철광석으로부터 용선이 제조되는 제선공정(Ironmaking Process) 반응에 대한 전체적인 모식도는 그림 1과 같다.

사용되는 석탄은 공기 중 산소와 연소를 통해 환원반응과 용융에 필요한 열(Heat)을 발생시키면서 일정온도까지 지속적으로 일산화탄소 가스(CO)를 공급한다. 석탄은 전통적으로 가장 활용이 용이하고 가격이 저렴한 장점이 있지만, 최근 공정 중에 발생되는 이산화탄소(CO₂) 배출을 포함하여 석탄 내부에 포함된 유황과 질소에 의한 불완전 연소물인 SO_x 와 NO_x 배출의 주 원인물질로 인식되고 있다 [7]. 반면, 석탄을 이용한 고로기반 공정은 오랜 동안 최적화 개선을 거쳐 현재 제철 산업의 주력 공정이 되어 가장 에너지 효율적인 공정으로 정립되었다. 특히, 고로제철법은 연속식이며, 최근까지 설비의 대형화가 추진되어 현재는 연산 500만톤 규모까지 확대되어 생산성과 에너지 효

Fig. 2. Ironmaking facilities available in domestic (As of July 2020).

율 최적화가 진행되었다. 지속적인 설비 대형화는 경쟁력의 근간이 되어 그림 2에 나타난 바와 같이 국내에 가동되고 있는 고로 12기중 내용적 5000 Nm³ 이상의 고로는 9개에 이르러 대부분의 고로가 대형화되어 있다. 이러한 추세는 국내 뿐 아니라 대부분의 철강사에서 공통적으로 채택하고 있는 추세로 에너지 효율화에 따른 경제성 및 환경성까지 고려할 수 있기 때문이다. 고로는 고체의 소결광과 코크스가 상부에서 장입되고, 하부에서는 열풍과 코크스의 연소로 발생된 환원 가스 사이의 열 교환과 환원이 효과적으로 이루어진다. 즉, 석탄 사용에 의해 광석 환원과 열공급이 동시에 구현되며, 설비 가동률도 95% 이상 유지 가능하다. 또한, 제품생산 공정과 연계하여 안정적 생산성 유지가 가능하다고 알려져 있지만, 최근 화석연료인 석탄의 사용으로 온실가스 배출이 불가피하므로 석탄 사용량 감소에 대한 요구를 동시에 받고 있다.

가) 탄소 및 수소에 의한 철광석 환원 [8]

1) 일산화탄소(CO)에 의한 환원 반응

고로에서 탄소는 철광석 환원 반응과 철과 슬래그의 용융에 필요한 반응열을 동시에 제공하는 역할을 한다. 1200 K에서 철광석의 간접 환원 반응에 의해 CO₂를 지속적으로 발생시키며, 전체 반응은 식(4)로 표현된다.

Fig. 3. Carbon, coupled in Reduction and Heat Sources [1].
 $\eta_{CO} = (\%CO_2) / [(\%CO) + (\%CO_2)]$

$$\Delta H^\circ (1200 \text{ K}) = -45.34 \text{ kJ/mol}$$

(1)

$$\Delta H^\circ (1200 \text{ K}) = 13.82 \text{ kJ/mol}$$

(2)

$$\Delta H^\circ (1200 \text{ K}) = -13.10 \text{ kJ/mol}$$

(3)

$$\Delta H^\circ (1200 \text{ K}) = -32.11 \text{ kJ/mol}$$

(4)

고로에서 일산화탄소에 의한 철광석의 간접 환원 비율은 전체 환원의 약 70%를 차지하며, 약간의 발열(Exothermic)을 동반하는 특징을 가지고 있다. 나머지 30%는 식(5)와 같이 노 하부에서 탄소에 의한 직접 환원반응에 의하며, 이때는 강력한 흡열반응(Endothermic)으로 진행된다.

$$\Delta H^\circ (1473K) = +151.39 \text{ kJ/mol}$$

(5)

부분적으로 발열 반응을 동반한 일산화탄소(CO)에 의한 환원반응은 에너지 효율을 높이는 주요 반응이지만, 배가스로 배출되는 가스는 이산화탄소(CO₂)로 이 부분이 온실가스배출에 관련된 이슈가 된다. 사용되는 열원은 환원반응 온도 유지, 생성된 철과 슬래그의 용융으로 나눌 수 있다. 따라서 고로에서 발생된 탄소 유래 CO₂ 발생량은 앞

서 언급된 환원반응과 열원으로 사용된 용도에 의한 결과물이다. 일반적으로 고로 환원제 비율(Reduction Agent Ratio; RAR, %)로 표시되는 석탄 사용 비율은 환원용과 열원으로 구별하여 살펴보면 그림 3의 (a)와 같이 가스 이용률(η_{CO})을 50%로 가정할 때, 대략 65:35의 비율이 될 수 있다[1]. 이 비율은 대상 고로의 용량, 사용 연, 원료 구성 및 각종 조업 환경에 따라 변화 가능하다. 또한 고로의 주원료 공급원인 소결광 제조 때에도 열원으로 석탄(분 코크스, 무연탄 등)이 사용되고 있어, 이를 함께 고려하면 그림 3의 (b)와 같이 이 비율이 다시 54:46으로 조정된다. 같은 방법으로 사용되는 코크스의 제조에도 역시 열원이 필요하므로 대략적으로 제선단계에서 사용되는 석탄 사용량 중 환원 반응에 활용되는 비율이 50% 이하로 추정된다. 따라서 총괄적으로는 석탄 기반 제선공정에 활용되는 석탄 사용비 중 약 50%는 환원에, 나머지는 열원으로 구성되는 것을 알 수 있다. 아래에서 탄소계 환원제를 수소함유가스 혹은 직접적인 수소 가스로 대체하는 제철공정을 설명하며, 이를 통해 CO₂ 감축 이슈를 보다 분명하게 이해할 수 있다.

2) 수소(H₂)에 의한 환원 반응

CO에 비해 수소 환원은 단계별 요소 반응에 따른 차이가 존재하지만 전체 반응은 아래와 같이 식(9)로 정리할 수 있다.

Table 1. 고로 조업에서 CO 를 H₂ 로 일부 대체시 간접환원열 계산 고로 조업조건.

기준 고로 조업조건	용선생산량 10,558 톤 / 일 , 코크스비 313.2 kg/t-HM, PCI 173.6 kg/t-HM, 송풍 853.8 Nm ³ /t-HM, 산소부 화 6.53%, 장입 철광석 (T.Fe 57.5%, FeO 5.97%) 1,652 kg/t-HM
COG 취입 고로 조업조건	용선생산량 10,558 톤 / 일 , COG 136.5 Nm ³ /t-HM 풍구 취입 , 코크스비 280 kg/t-HM, PCI 142.5 kg/t- HM, 송풍 675.0 Nm ³ -air/t-HM, 산소부화 10.80%, 장입 철광석 (T.Fe 57.5%, FeO 5.97%) 1,652 kg/t-HM

전술한 CO에 의한 철광석의 총괄 환원반응은 식(4)와 같이 반응영역에서 -32.11 kJ/mol로 발열반응(Exothermic) 특성을 갖지만, 총괄 수소 환원반응은 식(9)와 같이 흡열반응(Endothermic)임을 알 수 있다. 이는 전체 혹은 부분적인 수소 환원 반응은 추가적인 열적 보상이 고려되어야 하는 것을 의미하지만, 반응생성물로 물(H₂O)이 생성되므로 환경 친화적이다. 수소에 의한 철광석의 환원반응은 환원단계에서 일관되게 흡열반응이 이어짐에 따라 CO 환원 대비 열적 요구량이 증가한다. 따라서, CO 대비 수소가 주체가 되는 반응을 고려하면 반응기 온도 프로파일에 큰 변화가 있게 된다. 기준과 가정에 따라 다르지만 현재의 고로 내 CO 주체의 환원반응을 수소를 함유한 COG를 고로에 취입하여 CO를 일부 H₂에 의한 반응으로 대체시, 고로내 동일 Bosh Gas Volume을 유지하는 표 1의 고로 조업조건에서 계산하면 90,832 kJ/t-HM의 간접환원열이 감소하는 것으로 추정된다.

한편 H₂에 의한 환원반응은 온도 영역에 따라 다르지만, CO 환원 대비 반응속도가 빠르기 때문에 70% 수준의 목표 간접환원열을 고려할 때 비교적 초기단계에서 반응이 이루어지므로 빠른 환원반응을 요하는 상황에서는 유용한 특성을 가진다. 그러므로 난(難) 환원성 광석의 처리에 효과적으로 사용할 수 있고, 상대적으로 반응속도 및 광석용융반응을 가속화 할 수 있다. 다만 흡열반응에 대응한 추가적인 열 보상과 침탄에 의한 철의 용점 저하가 없으므로 고온 용융에 필요한 내화물 및 관련 공정을 재설계할 필요가 있다. 결론적으로 현재의 고로 기반의 제선설비에서 석탄을 대체해서 수소를 사용할 경우, 상대적 흡열 반응량의

증대에 따라 수직 온도 분포의 변동과 CO 대비 1/12 수준의 밀도 차이에 따른 통기도의 변화 등에 의해 용융물 생성 위치, 맥석의 분리성 그리고 노 상부의 열 부족에 의한 결로 현상으로 집진 시스템의 현저한 변경이 필요하다 [10]. 다시 말하면 현재의 고로 설비는 CO 가스의 환원-열교환을 전제로 설계되어 있으므로 일정 수준이상의 수소 함유 가스 혹은 단일 수소가스 취입 한계가 존재하는데 이 한계 이상의 공정 구현을 위해서는 별도의 개념을 가진 새로운 공정 설계가 필요함을 의미한다.

나) 탄소계 고로 기반 공정 특성

국내 철강산업은 일관제철소 방식을 도입한 이래 거듭된 개선과 도전을 통해 현재 세계적으로 강력한 생산 기술 경쟁력을 확보하고 있다 [11]. 일관제철소의 장점은 고로에 사용되는 소결광 및 코크스를 근접거리에서 제조, 공급하여 용선을 생산하고, 이를 제강-압연 공정에 연속적으로 제공한다는 것이다. 이를 통해 상 공정에서 발생된 잉여 부생 가스를 이용하여 전력생산과 하 공정(downstream)에서 필요로 하는 각종 재가열로의 버너용 열원으로 사용할 수 있는 강력한 경제성을 확보할 수 있다. 특히 대형 압연기 등 현대의 철강 제조공정은 대규모의 전력 사용에 의한 전동기 구동이 요구되며, 조업 규모에 따라 다르지만 32~70 MVA 규모의 전력이 필요한 만큼 소요 전력을 외부에서 구입하거나 자체에서 충당해야 한다. 외부 전력의 의존도가 높은 경우 구매 비용의 부담, 공급 안정성 및 변동성이 커지므로 적극적으로 자가발전에 의한 비율을 높이는 추세이다. 또한 제조공정에서 발생하는 부산물인 슬래그는 시멘트 클링커의 원료, 도로 매립재 및 건축 골재 등으로 활용되고 있다. 특히 시멘트 원료로 사용되는 고로 수재 슬래그는 그 비율만큼 석회석사용비율을 감소시켜 CO₂ 발생량 저하에 기여하고 있다. 결과적으로 제선 및 제강공정에서 사용되는 화석연료는 앞 절에서 언급한 바와 같이 크게 고유한 철광석의 환원반응과 반응열의 공급, 환원철 및 슬래그 용융, 추가 정련 및 가공에 필요한 에너지 및 전력생산과 가열로 버너의 공급 가스 연료(Feed)로 활용되는 용도로 구분된다. 따라서 현재의 고로 기반 일관제철소에서는 그림 4와 같이 석탄을 주요 에너지원으로 사용하지만,

Fig. 4. Energy and mass flow for modern BF routed integrated steel mill.

철광석의 환원 및 용융, 가열 연료 및 전력생산과 시멘트 원료 공급원 등의 다양한 용도로도 활용하는 자립적인 에너지 시스템으로 구조화되어 있다 [1]. 일관제철소 제선공정의 석탄 사용비는 그림 3에서 설명한 것처럼, 고유한 화학반응인 환원 반응에 소요하는 비율을 구분하여 고려할 때 조업 여건 차이 등의 변화를 감안하면 절반 수준이 활용됨을 알 수 있다. 이는 향후 대체 환원제를 사용하는 경우를 고려할 때 중요한 비교 판단 지표가 될 것이다.

제선단계에서 사용되는 석탄에 대해 일관제철소에서의 에너지 및 물질 흐름 예는 아래 그림 5와 같이 정리할 수 있다. 그림에서 용선 1톤 생산을 위해 사용되는 석탄이 720 kg이고, 이때 22,232 MJ의 에너지가 공급되는 것으로 가정하면, 제선단계에서부터 이어진 공정까지 사용되는 항목으로 분할해서 이해할 수 있다. 또한, 단계별로 직접적으로 사용되는 탄소와 단위공정에서 발생하는 부생가스와 이를 활용하는 공정, 그리고 외부에서 공급되는 동력 에너지(전력)로 설명될 수 있다.

다) 고로기반 CO₂ 저감형 Hybrid 제철기술개발('17~'24년)

전술한 바와 같이 일본을 포함하여 우리나라의 신예화된 고로는 대형화와 최적화를 거듭하여 효율 개선의 여지가 매우 적다. 그래서 우리나라의 제철산업에서는 추가적인 연료비의 저하 방식보다는 다음의 3가지 방법으로 CO₂ 저감을 모색하고 있다 [12]. 첫째 수소 함유 자원 또는 바이오매스(Biomass)와 같은 탄소 중립적 자원을 환원제로 사용, 둘째 철광석 등의 장입 원료를 고로에 사용하기 전에 사전 개질(Reforming) 또는 환원된 것을 사용하거나 완전히 환원된 스크랩 혹은 전기로 용 DRI(환원철)를 사용, 셋째 고온으로 배출되는 슬래그의 현열을 회수하는 방법이 거론되고 있다. 세 번째 방법에서 현재의 시스템은 수재 슬래그를 생산하여 시멘트 혼화제로 사용하고 있어, 요구되는 슬래그의 품질을 유지하면서도 안정적으로 열을 회수해야 한다는 어려움 때문에 지속적인 연구대상으로 남아있다. 이상의 방법은 개념적으로 제안된 신 공정 및 신 원료 사용

Energy Flow of BF route (Case Study)

Fig. 5. Typical energy flow for local integrated steel mill.

Fig. 8. Effect of injection of H_2 bearing by-product gas and feeding of LRI into BF on the mitigation of CO_2

단하는 상황은 현재의 에너지 가치사슬 측면에서 경제적이 지 못한 선택이지만, 국내의 전력 Mix에 따른 CO_2 발생 계수는 제철소 내의 총 CO_2 발생량을 감소시킬 수 있으며, 향후 재생에너지에 의한 그린전력비율이 높아지는 상황에서는 추가적인 CO_2 저감과 경제성이 가능하다. 위와 같이 석탄 기반 고로 공정에서 CO_2 발생량을 저감하기 위해서는 발생하는 부생 가스를 자체 환원제로 적극 활용하면서 하공정(Downstream)을 중심으로 한 에너지 수급은 청정 전력으로 대체하는 방식을 선택할 수 있다. 다만 이러한 경우 전력산업의 구조적인 개편, 청정 전력의 경제적인 공급 등이 전제되어야만 가능함을 반드시 염두에 두어야 한다. 이러한 상황을 전제로 그림 8에 나타난 것처럼, 본 과제에서는 현재 제철소내 발생 부생 가스의 적극적인 고로

취입시, 환원제비 감소에 의한 CO_2 감소량이 201 kg/t-HM 수준이나 외부 전력의 추가 구입에 의한 CO_2 발생량 68 kg/t-HM를 상쇄하면 133 kg/t-HM의 순 감소분을 기대할 수 있다. 이는 현재의 경제적 단가를 고려할 경우 선택하기 곤란한 수준의 제조원가 상승을 초래하므로 향후 여건 변동을 고려하여 선택할 수 있는 수단이다. 한편 우리나라와 유사한 철강생산 공정을 보유하고 있는 일본 철강업체는 철강연맹이 주도하여 2008년부터 2028년까지 파 일럿 수준까지 개발하는 COURSE50 프로젝트를 Phase I, II로 나누어 추진하고 있다 [26,27,28].

COURSE50에서는 그림 9와 같이 고로 하부에 함수소가 스를 취입하고, 환원가스를 포집 및 가열하여 고로 상부에 취입하는 방식을 통해 고로공정에서 CO_2 를 10% 저감하는

Fig. 9. Japanese COURSE50 Project [27].

Fig. 10. Comparison of H₂ content among kinds of Ironmaking processes.

것을 목표로 개발 중이다. 다만 프로젝트 전체 목표인 2050년까지 30% CO₂ 저감에는 고로 배출 가스 중 CO₂를 분리-저장(CCS)함으로써 CO₂를 저감하는 비율이 20%로 포함되어 있다. 또한 분리된 CO₂는 철강 Sector를 넘어선 사회 인프라에서 처리되는 것을 전제하고 있다. 이는 철강업은 CO₂ 절감 노력을 지속하지만, 사회적으로도 공동 노력의 책임이 있음을 의미한다. 고로공정에서 CO₂ 저감 목표에는 고로 배출 가스 중 환원가스를 분리한 후 가열하여 재사용하는 방식을 포함하고 있으나, 배가스 중 질소가 다량 함유되어 있어 흡착식 CO₂ 분리 방식을 채택하고 있다. 현재 우리나라에서 추진되고 있는 COOLSTAR는 합수소 부생 가스의 고로 취입 부분은 COURSE50와 유사하나, 수소를 함유한 환원가스로 유동 환원로를 이용한 저환원률 광석(LRI, Low Reduced Iron)을 제조하고, 이를 고로에 사용하는 부분이 차별적이라 할 수 있다. 또한 탄소 중립의 바이오매스 원료를 환원 및 열원으로 함께 사용하여 추가적인 탄소 대체 효과도 기대하고 있다. 한국과 일본의 CO₂ 감소를 위한 공통적인 기술적인 접근방식은 현재의 고로 기반을 전제로 부분적인 수소 환원을 포함한 시도라는 것이다. 즉, 현 COOLSTAR는 기존 탄소 환원제를 기반으로 하여, 탄소 환원제를 가용 가능한 수소 함유 가스로 부분 대체하는 목표를 가지고 있다. 이러한 기술적인 접근을 통해 다음 장에서 논의될 수소 환원으로의 전환 과정을 위한 기술 개발의 동력을 동시에 확보할 수 있을 것이다.

라) 수소환원 제철 공정 기술

1) 수소환원 제철 공정 특성

수소 환원은 CO 환원 대비 반응속도와 반응열, 그리고

생성물이 CO₂가 아닌 H₂O로 온실가스의 발생을 억제할 수 있다는 것이 강조되고 있다. 그러나 수소 환원에는 경제적으로 충분한 수소를 공급하는 것이 필수적이다. 이미 반응적인 측면에서의 상세한 연구, 분석은 다양하게 이루어졌지만 실제적으로 산업에서 활용하는 공정은 충분한 단계에 이르지 못하고 있다. 현재 대부분의 수소 농도가 높은 환원 반응로의 경우는 천연가스 개질(Reforming)을 이용하는 공정이며 대표적인 공정은 MIDREX, HYL 및 FINMET [29] 등이다. MIDREX 공정은 천연가스를 수증기를 이용하여 개질하고 상압의 Shaft 로에서 펠렛 및 괴광석을 개질가스를 이용하여 환원하여 DRI(Direct Reduced Iron) 제조, HYL 공정은 고압의 Shaft 로에서 펠렛 및 괴광석을 천연가스와 수증기를 Shaft 로로 공급하여 천연가스가 개질되면서 광석을 환원하여 DRI 제조, FINMET 공정은 천연가스를 수증기로 개질하여 다단유동로에서 분광석을 개질가스로 환원하고 환원된 분광석을 괴성화하여 HBI(Hot Briquetted Iron)를 제조하는 공정이다. 이외에 고로에 풍구를 통해 천연가스와 중유를 취입하는 경우와 다량의 미분 석탄을 고로에 취입함으로써 일정수준까지 수소 농도를 높이는 조업을 추진한 바 있다. 또한 석탄계 비고로 제선공정으로 상업화가 완료된 공정 중 COREX와 FINEX는 가공하지 않은 석탄을 직접 활용함에 따라 상당 수준의 수소가 포함된 환원 가스를 활용하고 있으므로 부분적인 수소 환원의 개념이 적용되고 있다고 할 수 있다. 이상의 제선공정별로 환원가스 중에 포함되어 있는 수소 농도는 그림 10과 같이 요약할 수 있다. 그림에서 보듯이, 기존의 천연가스나 중유를 풍구에 취입하는 경우는 COOLSTAR 나 COURSE50에서 추진하는 형태와 유사한 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 11. Comparison of CO₂ emission between BF-BOF routed and DRI-EAF based processes.

이 분류는 다시 탄소와 수소의 사용 범위와 함께 생산되는 제품의 형태를 용선(Pig Iron)과 DRI/HBI로 구분하면 그림 11과 같이 나누어 볼 수 있다 [1]. 수소 환원 비율을 높여나가는 장기 프로젝트는 기존의 고로-전로(BF-BOF) 기반과 환원철-전기로(DRI-EAF) 기반으로 나누어 추진되고 있다. 해외 각 철강사들은 지역별 상황 및 환경 등을 고려한 CO₂ 저감 전략을 채택 중이지만, 기본 방향은 탄소를 수소로 대체해 나가는 방식에서 유사하다. 다수의 유럽 철강사들은 상대적으로 풍부한 재생에너지 전력을 활

용한 수소 제조 및 활용을 장기 전략으로 채택한 반면, 일본과 한국은 지정학적 한계와 이미 상당수준으로 경쟁력을 갖춘 고로 기반이 확보되어 있기 때문에 유럽과 같은 재생에너지의 확대를 통한 친환경 수소 생산의 구체화가 곤란하다고 판단하여, 부생가스 중 수소를 고로에 활용한 부분 수소 환원 전략을 우선 채택하고 있다. 한편, 유럽 철강사 중 Tata Steel은 지난 10여년 동안 개발해 온 석탄 기반 HIsarna법에 CCS 기술을 병합한 CO₂ 저감 기술도 개발 중에 있다 [30].

적극적인 의미의 수소 환원 제철 공정은 앞서 기술한 방식보다는 필요한 수소를 화석연료에 의존하는 방식이 아닌 외부 그린 수소에 의한 것을 지칭한다. 그런 의미에서 외부 수소 기반의 수소 환원 제철의 기본적인 개념은 그림 12-A와 같이 재생에너지 기반의 전력에 의한 그린 수소 (Green H₂)의 생산과 고품위의 정제된 철광석을 활용하여 직접환원철을 제조한 후 전기로에서 용융시켜 제품 생산으로 연계하는 방식이다 [1]. 이 공정은 수소 생산, 전기로 이용 등에 요구되는 그린 전력에너지의 경제적인 수급과 수소 생산 방식에 있어 기술적인 접근은 다르나, 재생에너지를 활용하여 탄소 발생 없이 제조된 수소를 저렴하게 안정적으로 공급받는 것은 공통적인 전제 사항이다. 그러나 대부분 제시하고 있는 기술적 구현의 종료 시기를 2050년으로 선언하고 있지만, 현재의 개발수준이 TRL(Technology Readiness Level) 3~6 수준의 초기 단계이므로 앞서 언급된

Fig. 12. Common features of alternative H₂ based ironmaking projects in EU [1].

Fig. 13. Timetable for HYBRIT project along with related infrastructure [33].

많은 전제 사항을 극복해야 하기 때문에 향후 총체적인 진행과정을 지켜볼 필요가 있다.

2) EU의 수소 환원 신철 기술 개발

그림 12-B와 같이 유럽의 철강사들은 대부분 저탄소 전략 중 하나의 수단으로 수소 환원 제철기술로의 전환을 논의하고 있고, 다양한 명칭과 개념으로 보이지만 기본적으로 공통점을 가지고 있다. 수소 생산방식은 그린(Green) 전력에 의해 물을 전기분해하는 방식과 폐열에 의해 생성되는 스팀을 고체 전해질을 이용하여 수소로 치환하는 두 방식으로 나눌 수 있다. 두 가지 모두 외부에서의 그린 전기가 경제적으로 공급되어 이를 수소 제조의 주요한 에너지원으로 활용하는 것이 특징이다. 또한 생성된 수소를 이용하여 고품위 철광석으로 제조되는 펠렛을 샤프트 로(Shaft Furnace)에서 환원하여 DRI를 제조하고, 전기로에서 용융하여 용철을 제조하는 방식이다. 경우에 따라서는 펠렛 대신에 고품위로 선광(Beneficiation) 처리된 정광(Concentrates)을 직접 활용하는 유동로 환원을 통해 분체의 DRI를 제조하는 방식과 수소를 사용하여 광석을 플라스마를 매개로 고온에서 직접 용융 환원하는 방식 등으로 요약될 수 있다 [1]. 전기로 용융은 전력 구동 방식이므로 전체적으로 수소 환원 제철법은 그린 전력 기반의 철강제조 공정 변화로 귀결된다. 한편, 수소 환원은 반응 중에 석탄계 공정과는 다르게 광석의 환원반응에만 집중하기 때문에 광석에 포함된 맥석(Gangue)의 분리가 이루어지지 않고, 후속 공정인 전기로 제강에서 철의 용점 근방인

1813 K 이상의 온도에서 조업이 이루어져야 한다. 따라서 슬래그의 분리 제거를 위해 소비되는 과다한 에너지를 감소시키기 위해 광석을 고품위화하는 사전 선광 처리가 요구된다. 수소환원에서는 대부분 맥석의 비율이 3.5% 이내인 DRI용 고품위 정광(Concentrates)을 직접 혹은 간접적으로 활용하는 경향이 있다 [31]. 이는 광석 사용의 제약이 있음을 간접적으로 시사하고 있다.

유럽내의 철강업은 역사가 150년 이상으로 1950년대 후반부터 가동되었던 코크스 오븐을 포함한 관련 설비의 수명이 한계에 이르렀고, 주력 설비인 고로, 전로 등의 공정 설비가 특히 노후화되어, 설비 교체 혹은 새로운 공정 도입에 대한 판단의 기로에 서 있다 [32]. 일반적으로 철강 산업은 자본 및 설비가 집약된 산업으로 초기 투자비가 막대한 장치 산업 임이 잘 알려져 있는 사실이다. 그럼에도 불구하고 유럽 철강사들의 설비는 대부분 연산 100~300만 톤급의 소형설비로서 최근에 투자된 설비에 비해 경쟁력이 낮고, 무엇보다도 노후화에 따른 유지 보수의 한계를 가지고 있다. 한편, 역내 산업구조 또한 철강 산업을 포함한 중화학 공업에서 첨단 서비스 산업 등으로 변화되어 있는 상황이다. 그 밖에 철강을 이용한 자동차, 조선 등 전방 산업 규모가 작기 때문에 철강 산업에 대한 의존도가 크지 않은 것도 공정 및 산업 전환의 큰 이점으로 작용하고 있다. 반면에 정책적으로 공정 전환과 관련 에너지 인프라에 투입되는 막대한 재정적 필요를 동시에 고려하거나 산업계가 요구하고 있다. 이러한 조건이 모두 충족되어 새로운

Fig. 14. Future H₂ based integrated steel mill.

공정의 상업화가 이루어질 경우 적게는 60%, 최대 200% 이상의 평균 철강 제품가격의 상승을 지적하고 있다 [33]. 특히 주목할 것은 상당 수준의 CO₂ 감축 비율인 30% 이상의 시나리오에서는 기존의 석탄 기반 공정에 발생하는 탄소의 포집 및 저장 기술 등 현재 진행중인 기술이 모두 예정대로 진행된다는 가정하에 목표를 설정하고 있다는 사실이다. 대부분의 CO₂ 감축분은 현재 개발중인 CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) 기술의 구현을 통한 것이고 수소 환원 제철에 의한 저감 비율은 상대적으로 낮음을 알 수 있다 [34].

유럽 철강사 중 가장 적극적으로 수소 환원 제철 로드맵을 추진하고 있는 스웨덴의 HYBRIT 프로젝트를 중심으로 그린 전력에 의한 수소 환원 제철 공정에 관련된 이슈를 검토하였다 [32]. 스웨덴의 전력 믹스는 2019년 현재 원자력 42%, 수력 39%, 풍력 10%, 열 병합 9%로 이미 상당부분 저탄소형 전력 발생 구조로 전환되었으며, 향후에도 지속적으로 이 추세가 확장될 것으로 예상된다 [35]. HYBRIT 프로젝트는 그림 13과 같이 필요한 그린 전력을 확보하기 위한 로드맵도 동시에 구성하여 전력 산업 기반과의 체계적인 연계를 고려하고 있다 [33]. 사회적으로 적정한 재생에너지의 확장을 전제하여 관련 산업의 실행 계획도 구체적으로 제시하고 있으며, 수소 환원에 필요한 그린 전력에 대한 기반조성이 상당 수준 확보되어 있다. 또한, 전력산업 의존도가 높아지는 것을 고려하여 전체 프로젝트의 로드맵을 연동시켜 종합적인 기술개발 조건을 고려하고 있다. 세계 10위의 철광석 수출국인 점도 스웨덴 HYBRIT 공정에 필요한 안정적인 광석 사용 여건도 실현 가능성을 높이고 있다.

3) 수소 환원 기반 일관제철소의 전환에 따른 에너지공급 체계의 변화

기초 원자재(Commodity)로서의 철강재를 현재와 같이

공급하기 위한 조건을 전제로, 철강업이 필요한 가용 수소의 공급가격 및 요구량을 지난 2019년 9월 일본 수소 각료 회의시 일본제철에서 발표한 바 있다 [36]. 제철공정에서 석탄을 수소로 전환할 때, 제철용 석탄 가격을 200 \$/톤으로 가정하면 수소 가격은 7.7 cent/Nm³이 되어야 하고, 용철 1.0톤 생산에 필요한 수소량을 1,000 Nm³로 가정하면 세계적으로 연간 1.3 trillion Nm³가 필요한 것으로 제시하였다. 2020년 현재 국내 수소 시판가격은(제조공정 무시) 70 cent/Nm³ 수준이며, 정부 로드맵 상 2040년경 이를 1/3 가격으로 낮출 것으로 계획하고 있지만 여전히 수소 공급가격은 20 cent/Nm³ 이상이 될 수 밖에 없다 [29]. 탄소 배출 없는 수소 제조를 위해서는 추가적인 비용이 필요하며, 동시에 철강산업에 필요한 물량을 안정적으로 공급할 수 있다는 전제 사항도 동시에 만족시켜야 한다. 국내를 예를 들면 연간 생산량 3,800만톤 규모의 석탄 기반 철강 제조 방식을 그린 수소 기반의 수소 환원 방식으로 전환할 경우, 연간 370만톤의 수소가 소요되며, 이는 정부가 2040년 국가 수소로드맵에서 제시한 목표 수소 생산량 연간 526만 톤의 약 70% 수준에 해당한다 [37]. 여러 가지 가정과 전제 사항을 가진 수소 공급 단가와 수급을 고려한다면, 향후 많은 시간과 다양한 사회 경제적 인프라가 전제되어야 함을 알 수 있다. 현재의 철강 시장이 성숙되어 있음을 고려한다면, 향후 탄소 배출 없는 철강재의 가격 상승은 불가피할 것으로 예상할 수 있다. 최종 소비자가 철강을 사용하여 제품을 생산할 때 앞서 언급한 대로 현재보다 가격이 수백 유로 이상 상승할 수도 있으므로, 이에 대한 사회적 합의 등의 공론화도 강조되고 있다. 궁극적으로 수소 환원 제철 공정은 반응기에 공급되어야 하는 반응열, 제조된 직접 환원철(DRI)을 전기로에서 용융하기 위한 열원, 압연 공정 가열로(Reheating Furnace)의 열원을 탄소배출이 적은 전력을 활용하게 될 것이다. 현재의

탄소기반 일관제철소 방식과 비교하면 그림 14에 나타난 것처럼, 필수적인 철광석의 환원에만 그린 수소가 사용되고, 나머지 용융 및 압연 공정에 필요한 동력은 대부분 외부 전력에 의존하게 되는 상황으로 변동될 것이다. 수소 환원 제철공정으로 전환을 위해 가장 중요한 사항은 활용에 필요한 그린 전력이 철강 산업 외부의 사회 기반시스템에서 공급되어야 하며, 현재보다 외부 에너지 의존도가 더욱 커지게 될 것이다. 철광석의 환원 반응만 수소가 담당하며, 나머지 필요 에너지는 별도의 경로를 통해 공급되어야 하는 에너지 비동조화(Decoupling)가 발생될 것이다. 따라서 그린 에너지에 의한 수소 생산과 전력 확보를 위해서는 사회 시스템의 구축이 필요하며 정책 및 관련 산업과도 긴밀히 연계되어야 함을 알 수 있다. 앞서 검토된 연간 370만톤 수준의 그린 수소를 생산하기 위해서는 전력이 약 23.7 GWh가 소요되는 것으로 파악되며, 가격도 제조비용 기준으로 0.7 \$/kg 수준이 되어야 하며 동시에 수소 공급망이 제철소 인근까지 구축되어야 하는 상황을 고려해야 한다. 한편, 수소환원으로 전환되면 제철소에서 활용되어야 하는 전력 구입량이 급격히 상승되어 현재 약 80%를 자급하는 수준에서 100% 구입으로 변화되어야 하므로 수전 규모가 연간 3700 MWh로 현재보다 약 6.4배 높아지게 된다 [38]. 이는 고리 원전 신1호기 용량의 3.7배 수준이므로 그 소요량이 막대함을 알 수 있다. 최근 2050 EU의 철강 로드맵에서도 현저한 탄소배출을 감축하기 위한 전략 구상에서 새로운 기술과 더 많은 에너지 사용으로 톤당 35~100%의 추가 비용이 발생할 것으로 예측되고, 탄소중립 철강 생산을 위해 추가적으로 필요한 에너지의 양은 400 TWh로 현재의 7배 수준에 달할 것으로 예측한 바 있다 [35]. 동시에 그린 전력으로 공급되어야만 전 과정 탄소배출이 억제된 제철 공정이 실현될 수 있기 때문에 관련 에너지믹스 전환에 대한 장기적인 계획 및 실행이 전제되어야 한다. 또한 탄소 기반의 고로 공정에서 철광석은 그 동안 저품위 광석도 활용되었으나, 수소 환원 제철공정에서는 전기로 생산 철강재의 품질을 고려하면, DRI 제조용 펠렛 혹은 정광이 필요하여 저급 광석의 선광 처리와 펠렛 제조 공정이 필수적이므로 관련된 원료 수급과 공급 등에 대한 물류 변동 시스템의 변화가 예상된다.

3. 결 론

철강산업에서 탄소 저감에 대한 관심과 도전이 전지구적으로 논의 추진되고 있지만, 철강 시장은 글로벌화 되어 있고 국가마다 탄소세에 대한 법제화가 통일되지 않기 때

문에 이른바 평평하지 않은 운동장에서의 경쟁과 같다. 철강산업에서의 탄소 저감은 지속적인 기술개발과 설비 전환을 고려하되, 국내 전후방 산업과의 연계성, 국제 공조 등에 대해 유기적인 검토를 병행하면서 추진할 필요가 있다. 특히 수소 환원 제철은 철광석 환원 반응과 그 밖의 에너지 사용이 비동조화(Decoupling) 되어 철강업의 외부 전력 에너지 의존도가 크게 높아지기 때문에 그린 에너지에 의한 수소와 전력이 충분한 경제성을 가지고 공급되어야만 철강업의 경쟁력이 유지될 수 있을 것이다. 고로-전로 기반 투자가 비교적 최근까지 이루어진 국내 철강산업은 유사한 환경을 갖고 있는 일본 철강 산업을 충분히 참고하여 중장기적인 수소 환원 제철기술로의 전환 및 이행을 준비할 필요가 있다. 국내 철강산업은 향후 대량의 저가 수소 활용이 가능한 시기를 대비해, 고로 환원제로 사용하는 탄소(석탄)의 일부(최대 10%)를 부생가스 중 수소로 대체하여 고로 환원제비를 감소시키는 Lab/Pilot 단계 연구를 정책과제로 수행 중에 있으며, 개발 후 경제성 및 적용 가능성이 높은 기술에 대해 단계적으로 적용 가능성 검토 후 산업현장에 적용, 추진할 예정이다. 본 기술과 철강산업의 역량을 토대로 수소 환원에 대한 발판을 마련하며, 전면적인 수소 환원 철강 제조로 전환하기 위한 사회, 경제적 동조 방안을 함께 모색해 나갈 수 있다. 결론적으로 철강산업의 혁신 방향은 지정학적, 산업구조 및 경제 사회적 여건을 고려한 독자적이고 고유한 길(Pathway)이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제에 기초하였습니다. (No. 20172010106300)

REFERENCES

1. S. H. Yi, *Climate Change and Green Growth*, **19**, 13 (2020).
2. World Coal Institute, *Coal & Steel*, <http://www.worldcoal.org/coal-and-steel> (2006).
3. O. J. Kwon, *Through Iron&steel, I can see the world more vividly...*, pp. 213-214, FerroTimes, Seoul (2020).
4. M. Naito, K. Takeda, and Y. Matsui, *ISIJ Int.* **55**, 7 (2015).
5. Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), <http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/EnergyEfficiency2015.pdf> (2018).
6. World Steel Association(WSA), *World Steel in Figures*

- 2010 to 2020, <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html> (2020).
7. H. F. Wang, C. X. Zhang, J. M. Qie, J. C. Zhou, and F. Q. Shanguan, *J. Iron Steel Res. Int.* **24**, 235 (2017).
 8. A. K. Biswas, *Principles of Blast Furnace Ironmaking*, pp.214-220, Cootha Publishing House, Brisbane, Australia (1981).
 9. T. Stefan, *Scrap Supplements and Alternative Ironmaking 8*, AIST, Orlando, Florida (2020).
 10. J. Tang, M. Chu, F. Li, Z. Liu, and Y. Zhou, *Int. J. Min. Met. Mater.* **27**, 713 (2020).
 11. H. G. Lee, S. H. Yi, and C.O. Kang, *Proc. 6th Int. Cong. Sci. Tech. Ironmaking*, p.2849, Assoc. Brazilian Met. Mater. & Mining, Rio de Janeiro, Brazil (2012).
 12. W. J. Lee, *Bulletine of Steel, Korea Iron & Steel Association* **44**, 23 (2018).
 13. S. H. Lee and D. J. Min, *Steel Research Int.* **89**, 1800055 (2018).
 14. T. J. Park, J. S. Choi, and D. J. Min, *Metall. Mater. Trans. B* **50**, 790 (2019).
 15. T. J. Park, J. S. Choi, and D. J. Min, *Steel Research Int.* **90**, 1900001 (2019).
 16. J. S. Oh, H. S. Kim, J. H. Lee, S. K. Jung, and J. H. Lee, *ISIJ Int.* **58**, 2246 (2018).
 17. H. S. Han, Y. S. Noh, Y. K. Kim, W. S. Jung, S. M. Park, and W. B. Kim, *Nanoscale*, **11**, 2423 (2019).
 18. J. Y. Park, S. J. Kim, D. M. Hong, J. W. Im, C. J. Yoo, W. J. Dong, and J. R. Lee, *Electron. Mater. Lett.* **15**, 454 (2019).
 19. S. M. Park, Y. K. Kim, H. S. Han, Y. S. Jung, W. K. Yoon, J. I. Choi, and W. B. Kim, *Appl. Catal. B-Environ.* **248**, 147 (2019).
 20. J. S. Oh and J. H. Lee, *Metall. Mater. Trans. B* **50**, 1808 (2019).
 21. D. D. Geleta, M. I. H. Siddiqui, and J. H. Lee, *Metall. Mater. Trans. B* **51**, 102 (2020).
 22. S. M. Park, Y. K. Kim, Y. S. Noh, T. W. Kim, H. S. Han, W. K. Yoon, J. I. Choi, S. H. Yi, W. J. Lee, and W. B. Kim, *J. Mater. Chem. A* **8**, 138 (2020).
 23. H. S. Han, Y. S. Noh, Y. K. Kim, S. M. Park, W. K. Yoon, D. H. Jang, S. M. Choi, and W. B. Kim, *Green Chem.* **22**, 71 (2020).
 24. H. S. Han, S. M. Park, D. H. Jang, S. J. Lee, and W. B. Kim, *ChemSusChem* **13**, 539 (2020).
 25. T. J. Park, Y. H. Lee, D. K. Kim, and H. Kim, *Metall. Mater. Trans. B* **51**, 417 (2020).
 26. T. Ariyama, K. Takahashi, Y. Kawashiri, and T. Nouchi, *J. Sustain. Metall.* **5**, 276 (2019).
 27. Y. Ujisawa, K. Kakiuchi, K. Sunahara, S. Tomisaki, N. Ishiwata, K. Hase, and K. Araki, *Scrap Supplements and Alternative Ironmaking 8*, AIST, Orlando, Florida (2020).
 28. K. Nishioka, Y. Ujisawa, S. Tonomura, N. Ishiwata, and P. Sikstrom, *J. Sustain. Metall.* **2**, 200 (2016).
 29. A. Chatterjee, R. Singh, and B. Pandey, *Metallics for Steelmaking: Production and Use*, pp.80, Allied Publisher LTD, (2001).
 30. J. V. D. Stel, s. Santos, K. Meijer, P. Broersen, and T. Peeters, *Scrap Supplements and Alternative Ironmaking 8*, AIST, Orlando, Florida (2020).
 31. M. Pei, M. Petajaniemi, A. Regnell, and O. Wijk, *Metals* **10**, 972 (2020).
 32. Eurofer, *European Steel in Figures 2020*, <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/European-Steel-in-Figures-2020.pdf> (2020).
 33. D. Kushnir, T. Hansen, V. Vogl, and M. Ahman, *J. Clean. Prod.* **242**, 118185 (2020).
 34. Eurofer, *Low Carbon Roadmap: Pathways to a CO₂-neutral European steel industry*, <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> (2019).
 35. Swedish Institute, *Energy Use in Sweden*, <https://sweden.se/nature/energy-use-in-sweden> (2020).
 36. K. Shindo, *Hydrogen Energy Ministerial Meeting (H2EM2019)*, NEDO, Tokyo, Japan, <https://www.nedo.go.jp/content/100920883.pdf> (2019).
 37. Ministry of Trade, Industry and Energy, KOREA, 9th committee for Science and technology, http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=162264&bbs_cd_n=81¤tPage=131&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v= (2019).
 38. POSCO, Long term low carbon strategy(internal report) (2020).