

철강산업체 전기로(EAF) 설비에서 에너지절약 최신기술동향

* 오동환, 박현규, ** 박태준, ***임삼국
(* 주식회사 포스코, ** 포항산업과학연구원, *** 에너지관리공단)

New Energy Saving Technology of Electric Arc Furnace in Steel Making Industry

* Dong-Whan Oh, Hyun-kyu Park, ** Tae-joon Park, *** Sang-Kug Im
(* POSCO, ** RIST, *** KEMCO)

Abstract - The paper discussed for energy saving technology of electric arc furnace (EAF) in steel making industry. The energy of EAF in steel making process is nearly 10% of total manufacturing cost. This paper is shown new trend of energy saving technology and future study analysis of technological evolution of the EAF by 2010 issued IISI

1. 서 론

한국의 철강업은 국내 뿐만 아니라 국제적으로도 기초 소재를 공급하는 산업으로 중요한 역할을 담당하고 있으며 대표적인 에너지 다소비 업종이다. 에너지 문제와 밀접한 관계에 있는 지구온난화 문제가 표면화 되고 있고 1997년 12월에 일본 京都에서 개최된 기후변화협약 제 3차 채택국 회의(COP3)에서 2008년부터 2012년까지 CO₂의 년차적 감축목표를 설정한 "교토의정서"가 채택된 바 있다. 이와 같은 상황에서 에너지 다소비 산업으로서 철강업의 에너지 절약대책 실시에 대한 기대는 점차 높아질 것으로 생각된다.

국내 2003년도 철강소비량은 43,850천톤으로 예상되며 이는 전세계 철강소요 858백만톤의 5%에 달한다. 국내 2002년 조강생산량은 48,883천톤으로 전로 제강이 27,440천톤 전기로 제강이 21,443천톤으로 전기로 제강이 전체의 43.9%를 차지하고 있다.

전기로 업종은 사회적으로 폐기물인 고철을 원료로 하는 환경친화적인 산업으로 전기로 업종의 국내 고철 자급율이 70%에 달하고 있으나, 에너지 비용이 생산원가의 10% 이상을 차지하는 에너지 다소비 산업으로 에너지 절감기술 개발이 강력히 요구되고 있다. 본 논문에서는 전기로 부문에서 이루어 지고 있는 에너지절감기술의 최신 기술동향을 살펴보고 향후 발전방향을 전망하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

전기로는 전기에너지와 화학에너지를 열로 전환하여 스크랩을 용해하고 정련하는 설비로서 효율적인 조업을 위해서는 투입에너지의 이용효율을 극대화 시켜야 한다. 이를 위하여는 전기로 내에서 스크랩의 용해거동을 고려하여 에너지가 적절한 형태로 공급되어야 한다.

전기에너지는 아크형태로 스크랩에 열이 가해지고 열에너지는 투입된 전력량과 아크(Arc)형상에 의해 결정된다. 전극과 스크랩 사이에 전압을 걸면 극간 전위차에 의해 음극에서 열전자가 방출되어 열에너지가 전달된다. 이때 아크 길이는 전극간 간격, 음극 및 양극강하 전압과 아크 매질에 따라 결정되며 전압강하(Va)는 아래식으 나타낼 수 있다.

$$V_a = E_p * L + V_e$$

단, E_p 평균 전위강도 (공기: 1 V/cm)
L 아크길이 [mm]

V_e 음극,양극 강하 (30 ~ 50 V)

아크는 전류가 커질수록 또는 양극에 가까울수록 굽어지며 아크 길이방향에 대해 15° 각도로 넓어진다. 아크 직경(R)은 음극 Spot 반경(Rc)에 비례한다.

$$R = R_c * [1 + (L/R_c)^{0.5}]$$

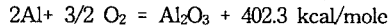
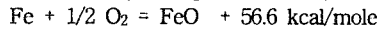
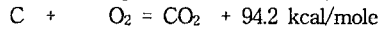
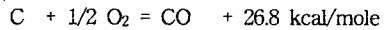
단, R_c = (I_a / π * J_c)^{0.5}

I_a 아크전류 [A]

$$J_c = 4.4kA/cm^2$$

아크 발열은 대류,복사,전자충돌과 아크 측면에서 형성되는 Flare (Arc Plasma)의 대류,복사등에 방법으로 용강에 전달된다. 통상 아크 발생열의 73%가 용강에 전달된다.

화학에너지는 전기로 장입 스크랩중 대부분의 성분은 용락(melting down) 이후 노내 투입되는 산소에 의해 산화되어 SiO₂, MnO, FeO 등 산화물 생성시 발열에 의해 발생하며, 산화물은 매용체로 투입된 CaO와 함께 슬래그를 형성한다. 이때 장입성분중 산화반응은 아래와 같다.



2.2 전기로 Heat Balance

전기로를 이용한 철강 제조비용 구성은 원료인 스크랩이 52% ~ 65%, 전력비 10% ~ 18%, 정비비 7% ~ 12% 기타 재료비 등으로 구성되어 있어 에너지절감이 생산성 향상과 직결되어 있음을 알수 있다.

전기로에서 입출력 에너지를 보면 그림1.과 같이 입력되는 에너지원은 전극봉으로 주입되는 전기적 에너지와 산소취입에 의한 산화반응열, 보조버너(post combustion) 등으로 주입되는 화학적 에너지가 있다. 출열되는 에너지는 용강에 전달되는 열이외에 배가스 및 냉각수 배열, 전력손실, 대기방사,내화물 및 슬래그 열손실 등이 있다.

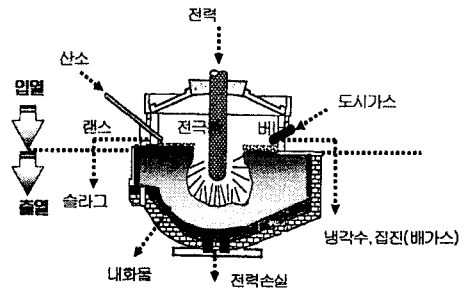


그림 1. 전력원단위에 영향을 주는 인자

전기로에서 전력원단위에 영향을 주는 인자는 장입되는 원료의 조건, 투입되는 전력 및 산소등 유틸리티와 출강온도, 열손실 인자등에 좌우된다.

2.3 전력원단위 절감기술

전기로의 전력원단위 절감기술은 다음과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다.

- o 조연버너, 산소, 분체 취입등에 의한 대체에너지기술
- o 고철예열에 의한 열회수기술
- o EBT, 가스저취, DC로, 슬래그 포밍 등 방열저감에 의한 열효율향상기술

1) 대체에너지에 의한 전력절감

조연버너는 연료로 중유, LNG를 사용하고 산소를 공급하여 고철을 가열함으로써 용해 촉진한다. 버너의 설치 위치는 Cold Spot 부위로 설정하고 설치 기수는 3~5기 정도가 일반적이다. 노용량이 클수록 설치수를 증대한다.

산소취입은 고철과 용강에 직접 산소를 불어넣어 고철의 Cutting 및 산화반응을 촉진하여 가열, 용해속도를 향상시킨다. 산소의 사용량이 증가할수록 전력원단위는 감소하는데 산소원단위 30Nm³/ton 이하에서 산소 1Nm³/ton당 4~5kWh의 전력원단위가 감소한다.

분체취입은 전기로 제강시 전력절감과 회수를 향상 및 조업안정화를 위하여 실시한다. 분체는 탄소분체와 Al회를 사용한다. 탄소분체는 코크스분 또는 흑연분을 슬래그와 용강사이에 취입하고 산소부화조업에 의한 과잉산소와 C-O반응을 촉진시켜 반응열에 의한 대체에너지 공급과 CO가스에 의한 슬래그 포밍을 발생시킨다. Al회는 Al 정련과정에서 나오는 Dross로 금속 Al이 30~45% 함유하여 산화환원 반응열에 의해 전력원단위가 4~5 kWh/kg-Al 감소하는 효과가 있다, 또한 강중 C와 O의 급격한 반응에 의한 용강 Boiling 방지 목적에서 사용한다.

2) 전기로 배가스 열회수

전기로 배가스 온도는 300~700 °C 정도로 이 폐열을 이용하여 장입 Bucket내의 고철을 예열하는 장치가 SPH (Scrap PreHeating)이다. 배가스 현열의 20~30% 회수가능하며 전력원단위가 10~35 kWh/ton 감소하고, 제강시간(TTT)이 1~6분/ch 절감가능하다. Bucket예열 방식은 고철예열시 환경문제가 발생하여 현재 국내에서는 사용되지 않고, Twin 예열방식으로 전환하고 있다.

3) 방열저감에 의한 열효율 향상

열효율 향상을 위하여 아크열의 외부방사를 최소화하기 위해서는 제강의 비통전시간을 단축시킬 필요가 있다. 전기로 덮개의 승강 및 선회 속도를 고속화시켜 원료장입시간을 단축하거나, 노벽체의 수냉화 및 내화물 열간보수 로복과 전극접속 로복 채용등으로 보수시간을 단축하기도 하고 1전원 2로의 Twin방식을 채택하여 대차보수시간을 단축하기도 한다.

가장 방열효과가 큰 것은 슬래그 포밍으로, 분체의 취입에 따른 포밍을 발생시켜 전기로 아크를 감싸서 아크 복사열의 방열방지와 Long Arc 조업(고역율조업)이 가능하여 전력원단위 절감에 중요하다.

2.4 에너지 절감 최신 기술동향

1) 슬래그 포밍 (Slag Foaming) 기술

전력에너지를 대체하기 위한 수단으로 산소취입량을 증량하여 발생하는 산화열을 적극 이용하는 방식으로 보

조열원으로 산소 (25 Nm³/ton-steel) 사용시 전력대체 (100~120kWh/ton-steel) 가능하다.

산소 취입중대 Fe 또는 Cr의 유기금속이 산화되고, 슬래그의 산화도 증가를 개선하기 위해 분코크스등을 취입하는 Carbon Injection 기술을 사용하면 과산화된 슬래그에 Carbon 취입시 환원반응에 의해 발생하는 CO가스에 의해 슬래그가 포밍(Foaming)되어 유면이 상승되고 아크가 슬래그 속에 매몰됨으로서 Submerged Arc가 형성되어 복사열 손실감소, 아크젯트에 의한 용강 또는 슬래그 비산 차단으로 노벽의 손상 감소등의 효과가 있다. 슬래그 포밍 특성은 슬래그 조성과 가스발생속도를 나타내는 분탄연소속도에 의존하며 슬래그 최적화와 분탄연소속도제어를 통하여 2차연소에 의한 에너지 절감을 극대화할수 있다.

슬래그중 2차 연소기술은 에너지 공급측면에서 2차 가스연소반응은 (CO + 1/2 O₂ = CO₂) 고체-기체간 반응인 1차연소 (C + 1/2 O₂ = CO₂) 보다 약 2.5배의 에너지 발생과 함께 연소반응속도가 매우 크다. 또한 2차 연소반응을 기상이 아닌 슬래그중에서 유지하는 경우 교반력에 따라 80~90% 정도의 열전달 효율을 나타내는 것으로 알려져 있다. 실제 슬래그중 2차연소기술을 통하여 북미 전기로 업체는 50kWh 수준의 전력원단위 감소와 5~10%의 생산성 향상을 이룬 사례가 보고되고 있다.

전기로 소음은 설비측면에서 전극봉에 의한 아크소음, 수냉팬스에 의한 산소젯트음, 버너소음등으로 구성되며 슬래그의 높이는 슬래그도어에서 유출되는 걸보기 슬래그 높이와 아크소음의 주파수 크기와 밀접한 관계가 있음이 밝혀져 최근에는 슬래그의 높이와 아크소음의 상관관계를 구하여 최적의 슬래그 포밍제어를 시도하는 연구가 수행되고 있다.

2) 아크로 통전패턴 최적화

전기로에 공급된 전력은 전극봉-스크랩-전극봉의 통로가 형성되며 아크가 발생하며 공급된 전압과 전류에 따라 일정한 길이까지 아크가 발달한다. 전극봉과 스크랩 또는 전극봉과 용강사이에 형성된 아크는 국부적으로 최고 4000°C 에 이르고 발생된 열은 대류, 복사, 전자충출을 통하여 70% 정도 스크랩 또는 용강에 전달된다.

이때 발생되는 아크의 길이는 전압에 비례하고 동일 교류전압에서는 역률에 비례한다. 스크랩 용해를 빠르게 하기위하여 높은 유효전력을 사용하여 전력투입속도를 높이게 되면 고전압, 고역률의 Long Arc가 형성된다. 전극봉 전류와 유효전력, 역률, 회로손실간의 관계는 그림 2와 같다.

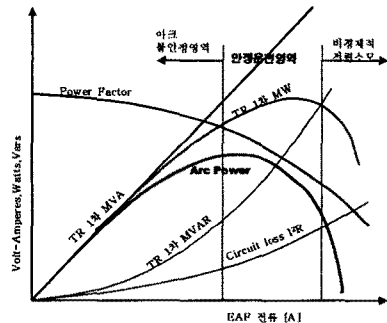


그림 2. 전기로 운전의 전력특성곡선

노벽으로의 전열을 최소화하고 스크랩의 용해속도를 최대화하기 위하여 스크랩의 용해상황에 따라 아크길이 또는 전력투입속도를 적절히 조절한다. 전기로 변압기에서는 1차전압을 강압하여 일정간격의 Tap를 통한 전력을 공급한다, 높은 Tap 은 고전압을 의미하며 같은 Tap

내에서는 전류치를 변화시켜 유효전력 또는 역율을 조정한다. 이와 같은 Tap의 조합을 전기로의 통전 패턴이라 부른다.

전기로의 생산성 향상을 위하여 주용해기에 설비가 허용하는 최대전력을 투입하여 스크랩의 용해를 최대한 빠르게하고 고전압, 고역율의 Long Arc을 사용한다. Long Arc에 의한 스크랩의 완전 용해후 저역율의 Short Arc를 이용하여 노하부에 형성된 용강으로 전열이 이루어지도록 한다. 이때 수냉판넬의 냉각수 온도 변화율을 계산하고 냉각수의 급격한 온도변화를 구하여 스크랩의 용락에 따른 노벽 노출시기를 판단하여 Arc 통전패턴을 변경하여 최적조업이 되도록 한다.

3) Long Arc 이용 UHP 조업

UHP (Ultra High Power)조업은 1964년 Schwabe등이 전기로에 대용량 변압기를 적용하여 스크랩의 용해시간을 대폭 단축시키었다. 초기 UHP조업은 아크의 역율을 70.7%로 저전압 고전류의 Short Arc을 통한 대전력 투입으로 조업시간 단축, 내화물에 대한 열적, 물리적 부하경감, 열에너지의 용강전달을 향상등의 효과가 있었으나 전력원단위와 전극원단위가 높아지게 되는 단점이 있어 고전압, 저전류의 Long Arc 조업이 상대적으로 무효전력이 작고 전력원단위 및 전극원단위면에서 유리하여 오늘날 대부분 Long Arc 조업을 기본으로 한다.

대부분의 AC아크로는 2차측 최대전압이 650V으로 전기로 조업을 하나 이는 내화물과 수냉판의 수명을 고려한 방사열의 한계에 기초하고 있다. 최근에 슬래그포밍 기술과 수냉판 기술이 발전하여 2차전압을 1,500V 까지 상향하고 있으나 국제규격 IEC60519-4(1999)에서는 전기로의 운전전압 상한치를 1,000V으로 규제하고 있다.

Long Arc 조업은 (1) 높은 열방사로 스크랩을 적게 파괴 들어가면서 효율적으로 용해하고 (2) 유효전력 증대로 동일 전류로 짧은 시간에 용해가능하고 (3) 스크랩과 이격거리가 길어서 전극봉 소모량이 감소하는 장점이 있으나 내화물의 마모정도를 나타내는 내화물지수(Re)는 전압의 제곱에 비례하는 것을 고려해야 한다

$$Re = I_a \cdot U_a^2 / d^2$$

단, I_a 전극봉 전류 [A]

U_a 아크전압 [V]

d 전극과 내화물간 거리 [m]

아크의 안정도를 향상시키고 저전류와 Long Arc로 조업하기 위하여 직렬리액터(Series Reactor)를 전기회로에 설치용하는 방법이 Nucor-Yamato Steel에서 시도되었다. 이 방식은 초기 용해기간 동안만 고정된 값의 직렬리액터를 연결하고 용해가 진행되는 동안에 Arc변화 및 전류, 전압, 전력의 조건에 따라 리액턴스 값을 가변하여 동적제어하는 방법이다., 직렬리액터의 도입으로 회로의 임피던스가 증가하고 아크전류는 감소하게 되어 줄어드는 전력은 2차전압을 상승시켜 보상한다. 이러한 직렬리액터 방식의 장점은 다음과 같다.

- 아크 안정도 증가 와 기계적 공진현상 감소
- 전극봉 손상과 소모량 감소
- 용해시간 단축
- 전기로에 공급되는 유효전력 증가
- 전원전압의 흔들림 감소

대전력 투입을 위한 UHP 전기로용 변압기 용량은 스크랩의 용해에 필요한 전력량과 스크랩의 용해시간으로 결정한다. 변압기 효율은 통상 70% 정도 적용한다.

전력량 산출을 위한 전력원단위는 장입원료의 종류, 형상, 온도, 산소원단위 등에 의한 변화, 노내 원료붕괴현상과 부연료등 절연물의 간섭에 의한 편차를 고려한다. 산소부하조업시 1 Nm³당 3.5kWh/ton, 스크랩예열 적용시 평균 예열온도 1 °C당 0.196kWh/ton을 적용한다.

$$\text{변압기 용량} = \text{전력량} / (\text{용해시간} \cdot \text{변압기효율})$$

$$\text{용해시간} = \text{역시간} \cdot \text{가동시간} \cdot \text{로용량} / \text{생산능력} \cdot \text{준비시간}$$

2.5 전기로의 향후 기술발전 전망

국제철강협회(IISI)에서 '전기로 공정은 향후에도 철강 산업에서 여전히 매력적인 프로세스로 남을 것' 이라며 1990년에 수행된 IISI의 EAF 조사결과와 비교하여 2010년의 EAF 발전방향을 아래와 같이 예측하였다.

- 전기에너지 소모량은 392 kWh/ton으로 13% 감소
- 교류전기로의 흑연 전극봉 소모량은 1.9kg/ton으로 34% 감소
- 내화물 소모량은 3.1kg/ton으로 53% 감소
- 로 생산성 94t/h으로 54% 향상

위에서 13% 전기에너지 소모량 감소원인으로

- 용탕받기 시간 간격이 35분 단축
- 산소투입량이 6 Nm³/ton 증가
- 용탕 받은 온도가 25 °C 낮아졌음을 들고

또한 전극봉 소모량 감소와 생산성 향상은

- 전기에너지 소모량 감소
- 대용량 전력설 및 교류전기로의 높은 아크전압
- 전원분리시간 단축등으로 꼽았다.

IISI가 예측하는 2010년의 EAF 조업기술은 아래와 같다.

- 제강시간(TTT)는 58분에서 45분으로 단축
- 전력원단위는 360kWh/ton 수준
- 코크스취입량 23kg/ton, 산소취입량 40Nm³/ton 증대
- 스크랩 예열은 300 °C까지 증가하고 2차연소 채용
- 철원의 제약으로 스크랩은 주류를 이루지만 용선, 주철, DRI/HBI 사용이 증가
- 판매생산위한 극저탄소강 생산 증가

3. 결 론

전기로에서 에너지 절약기술은 4가지 대표적인 기술 : Long Arc을 이용하는 UHP조업, 산소취입량 증대, Carbon Injection, 슬래그 포밍기술을 중심으로 개발되고 있다. 그러나 일정량의 스크랩을 용해하여 목표로 하는 용강온도를 얻기위하여 필요한 에너지의 70%를 통전에 의한 전기에너지를 사용한다는 점에서 전력에너지의 절감기술개발이 중요하다.

또한 100MVA 이상의 대형 변압기, 고임피던스 조업 방안, Flicker 제어, 전극봉송강 자동제어장치(ECS : Electrode Control System), 전력자동제어등과 같은 전력계통의 안정화를 위한 전력설비기술들의 개발이 필요하다. 또한 전기로내 스크랩의 용해상태에 따라 아크전압, 전류가 영향을 받으므로 아크의 전압, 전류 변화를 예측하거나 아크소음의 분석을 통하여 전기로내 상황을 추정하고 다음 단계의 스크랩 용해상태를 예측하여 이에 맞게 전극봉의 전압, 전류를 최적제어하는 신기술은 에너지 절감에 획기적인 기여가 예상되므로 향후 적극적인 연구 개발을 추진해야 할 것으로 사려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국철강협회 "국내의 철강업 현황" 한국철강협회, 2002
- [2] 전재욱, 이광근, "미니밀 전기로 전력원단위 영향인자 검토" POSCO 미니밀기술부회, 2002
- [3] 김용환, 송효석, 김동식, "AC 전기로와 통전패턴", 제로마당 제14권 제2호, 2001
- [4] Manfred Bock "long Arc Operation" IISI 60th Electric Furnace Conference Proceedings, 2002
- [5] Jean Pierre Biret, "A Future Study Analysis of the Technological Evolution of the EAF by 2010", IISI, EAF Technology, 2000
- [6] Charles R Taylor, "Electric Furnace Steel Making ", IISI, 1985