

# 철강 제련 기술의 개발 동향

백영현 · 고려대학교 교수, 재료 · 금속공학부

철강의 대량 생산 방식으로 고로-LD전로로 구성되는 일관제 철법이 정착되었으며, 철강 생산 기술의 발전은 공정의 연속화, 자동화 및 설비의 대형화 등에 초점이 맞추어져왔다. 앞으로도 고로-LD전로법은 사회적 요구에 끊임없이 적용하면서 세계 철강 생산의 주역으로 그 임무를 계속 수행할 것이다. 그러나 선진 철강국의 설비 노후화와 함께 그 생산 비중은 계속 감소할 것이며 그 자리의 일부는 용융 환원 신제철 기술로 대체되고, 이와 병행하여 고철을 위주로 한 전기로 제강의 비중이 상대적으로 증가할 것으로 전망되고 있다.

최근 선진 철강국을 중심으로 개발 중인 용융환원제철법과 전기로 제강 분야에서 Thin slab casting 및 Strip casting 등의 혁신 기술들이 활발히 개발되고 있으며, 2000년대에는 실용화되어 철강 업계에 큰 변화를 가져오게 될 것이다. 결과적으로 판재류의 혁신 기술을 토대로 하는 Mini-mills는 앞으로 기존의 철강 제련사와 판재 분야에서 첨예한 경쟁 관계를 갖게 될 것으로 예상된다.

## 철강 제련 기술의 탄생

### 철

강 제련이란 말은 製鉄과 製鋼의 줄인 말이며 일반적으로 현대 제철에 있어서 제강은 제선 공정을 거치게 되므로 이와 같은 말이 생겨나게 되었다. 어느 민족이 철강을 처음으로 제조하였는가는 알 수 없지만, 가장 신빙할 만한 자료에 따르면 기원전 10세기 경에 독일이 먼저 시작한 것으로 알려져 있다.

이때 사용된 爐는 土坑爐 또는 低床爐 형의 것으로서 철광석을 용융하여 직접 철을 만들었으며, 이 노를 Rennofen이라고 불렀다. 여기서 생산된 철은 Luppe라고 하며 저온

용융 상태에서 만들어졌기 때문에, 탄소, 규소의 함량이 낮아 鋼에 가까운 제품을 얻었을 것으로 추정된다. 水車에 의한 송풍 기술의 발달로 Rennofen의 높이를 증가시킬 수 있게 되었고, 종말에는 Stückofen으로 발전하였으며 목탄과 철광석을 함께 장입하여 대형의 철판(Stücke)를 생산할 수 있었다.

기술의 발전에 따라 Stückofen의 높이가 점차로 높아져 高爐, 일명 용광로가 되었으며 고온을 얻을 수 있게 되어 철광석에서 환원된 철은 액상으로 노저에 모이고 광석 중 여타 성분은 鑛滓가 되어 용철 위에 떠서 분리시킬 수 있는 방식이 확립되기에 이르렀다. 이때 용철은 다량의 탄소와 규소 등의 불순물을 흡수하게 되어 불순철인 鐵鐵이 된다. 그러므로 고로에서 제조된 철은 가공성이 없으며, 이와 같은 철을 가공하기 위해서는 정련 과정을 거쳐 탄소, 규소 등과 같은 불순물들을 산화·제거시켜야 한다. 이 과정을 제강이라고 한다. 이와 같이 초기에는 가공이 가능한 철판을 직접 생산하였으므로 이를 '직접제철법'이라고 부르며, 다음 고로에서 생산된 선철은 제강 과정을 거쳐야 하므로 '간접제철법'이라고 부르게 되었다.

고로는 다량의 목탄을 사용하였으나 철의 수요가 증가함에 따라 목탄의 고갈 현상이 두드

러저 코크스(coke)를 사용하기에 이르렀고, 또 증기 기관의 발명으로 송풍이 용이하게 되어 고로의 규모는 더욱 대형화되었다. 고로가 현대의 모양을 갖추게 된 것은 18세기 중엽의 영국과 18세기 말엽의 Ruhr 지방에서 비롯하였다고 할 수 있다. 이때 이미 고로, 제강로, 압연 공장을 갖춘 一貫製鐵所 형태의 제철소가 탄생하였다.

한편, 고로에서 생산된 선철은 목탄으로 가열 용해하며 과량의 공기를 주입하면서 脫炭시켜 제강하는 제련법이 시행되어왔으나, 차츰 목탄 대신 석탄을 사용하는 제련법으로 변천되었다. 그러나 석탄에 다량 함유되어 있는 황이 철에 용해되어 질을 저하시키는 것이 단점으로 대두되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 18세기 말경 독일에서 새로 개발된 제강법이 Puddeln제련법이다. 이 제련법은 철과 석탄의 직접 접촉을 피하고 화염만이 접촉하도록 하여 熔存炭素를 산화·제거시키기에 이 반응을 촉진시키기 위하여 爐 내의 용철과 용융 광재를 함께 교반시키는 것이다. 이와 같이 제강법이 획기적으로 개선되어 유럽에서 수많은 Puddeln로가 조업을 하였음에도 불구하고, 그 능률이 날로 증가하는 강철의 수요를 충족하기에는 역부족이었다.

제강법에 다시 큰 혁명을 이루게 된 것은, 영국의 H.Bessemer가 1850년경 Bessemer 전로(converter)를 발명하여 대량의 강철을 손쉽게 제련할 수 있게 된 후부터이다.

Puddeln로가 24 시간에 걸쳐 행했던 작업량을 단 20 분 동안에 제련할 수 있어, 이 시기의 철강 생산 국가에 일대 선풍을 일으켰다. 이 제강법은 용강에 공기를 직접 주입하여 탈탄을 실시하는 것인데, 한 가지 문제점은 손쉬운 규산질의 내화물을 전로의 라이닝(lining)에 사용한 결과 염기성의 광재를 만들 수 없어 脫磷이 불가능하였다. 따라서 Bessemer 전로법은 자연히 인의 함유량이 적은 선철에만 국한되었다. 그후 1878년 S.H.Thomas는 苦灰石계의 염기성 내화물을 발견하여 이 문제를 해결하게 되었다. 따라서 Bessemer 또는 '산성제강법'에 대하여 Thomas의 것은 '염기성제강법'이라고 부르며 탈황과 탈인이 동시에 가능한 현대 제강법의 기초가 되었다.

그러나 Thomas법은 공기를 노저에서 취입하기 때문에 鋼 가운데에 질소, 산소, 그리고 인의 함유량이 높으므로 저급강밖에 제조할 수 없었다. 다행스럽게도 1894년 Linde는 산소를 공업적으로 제조할 수 있는 기술을 개발하여 산소제강법을 가능하게 하였다. 1949년 드디어 오스트리아에서 '순산소상취제강법'이 개발되었으며 1952년 비로소 LD제강법으로 개선되었다. 이 LD제강법은 생산 능력 향상, 품질 고급화, 생산비 절감, 높은 인을 함유한 선철이라도 효과적으로 처리할 수 있어 세계적으로 널리 보급·사용되게 되었다. 물론, 고철도 동시에 처리할 수 있다는

장점이 있어 LD제강법은 현재 제강의 주역  
을 담당하고 있는 공법이다.

### 철강 제련 기술의 완성

세계의 조강 생산량의 변화를 보면, 1950년  
의 약 2억 톤에서 70년대 중반까지 급속한  
성장을 거듭하여 7억 톤에 이르게 되었으며,  
1989년도에는 약 8억 톤으로 사상 최대의 생  
산량에 도달하였고 그후 거의 정체 상태를 보  
여주고 있다. 이와 같은 생산의 증대는 철강  
설비의 대형화, 고속화, 연속화 등에 의하여  
뒷받침되었다.

철강 제련 기술은 60년대에 접어들면서 원료  
의 다양화 및 대량 수요에 대응하기 위하여  
기술적·정책적 뒷받침이 필요하였으며, 또  
한 세계적인 에너지 파동의 결과로 에너지 절  
약과 반응열의 적극적인 활용 기술을 요구하  
게 되었다. 특히, 철강 제련 분야에 치명적인  
영향을 미친 것은 강력한 공해 규제와 인건비  
상승에 따른 공정의 자동화 및 작업 환경의  
개선에 대한 것이었다. 이에 노후 설비를 보  
유하고 있던 선진 철강국들은 이와 같은 문제  
를 해결하기 위하여 과도한 투자를 필요로 하  
는 반면, 한국과 같이 최신 설비를 갖춘 신생  
철강 생산국들은 상대적으로 유리한 입장에  
서게 되었다.

현재의 철강 제련 기술은 앞에서 지적한 시대  
적인 요구에 착실히 순응하면서 개선에 개선  
을 거듭하여 완성형에 가까운 공정으로 발전

시켰다. 이것을 가능하게 한 것은 역사적으로  
축적된 제련 기술과 노하우(know-how), 고  
온 물리화학과 반응공학의 발전, 주변 기술  
즉, 기계, 전자, 계측, 컴퓨터 등의 획기적인  
발전, 고온 재료의 개발, 그리고 축적된 대형  
자본 등의 뒷받침이라 하겠다. 특히, 세계 조  
강 생산량의 약 60%를 점유하는 선철 제조  
공정인 고로법은 고효율, 고생산성, 고환원  
능력 및 장수명 등의 특성을 구비하여 완성화  
되었으며, 이것은 인간이 이룬 기술 가운데  
가장 신뢰성있는 것의 하나가 되었다.

철강 제련은 제선, 제강 및 열연 등의 공정으  
로 이들 공정이 유기적으로 연결되어 이루어  
질 때 우리는 일관제철이라고 부른다. <그림  
1>은 철강 제련 공정을 계통적으로 보인 것이  
다. 이 그림에서 계통 A는 전통적 제련법이  
고, 계통 B는 하부 계통(down stream)에 있  
어서 연주·직송압연법으로 제강법을 개선한  
것인데 이것은 현행 철강 제련의 기본이 되고  
있다. 계통 C는 역시 용강을 직접 스트립 주  
조(strip casting)하는 공정으로 한층 더 개  
선시킨 것인데 현재 개발 중이다. 이와 같이  
하부 계통은 꾸준히 개선되어가고 있는 반면,  
상부 계통(upper stream)은 근본적으로 개  
선된 바가 없다. 근래에 와서 고로법에서 탈  
피하여 용융환원법(smelting reduction  
process) 즉, 계통 D로 대체하려는 시도가  
이루어질 뿐이다.

제강 공정의 주류를 이루고 있는 산소제강법

(LD-process)는 점차 대형화되어가고 있으며 반응의 촉진과 불순물의 제어에 초점을 맞추어 발전하고 있다. 특히, 1960년 후반부터 도입된 연속 주조(con-cost)의 기술은 80년대에 와서야 안정된 공법으로 발전을 보게 되었다. 이로 인하여 연연주비의 향상을 통한 생산성 증대, 표면 및 내부 품질이 우수한 연주주편을 생산하게 되었다. 이것은 고청정, 고순도 용강의 제조를 위한 2차 정련(ladle metallurgy) 기술의 발전 즉, 정련 기술의 도약을 통해서만 가능하였다.

일반적으로 용강 중의 불순물로 존재하는 탄소, 황, 인, 질소, 산소 등은 강의 기계적 성질 및 가공 특성을 저하시키는 원인이 되기 때문에, 이들 성분의 제거 및 제어를 위한 정련 기술이 필요하다. 과거 60년대의 탈탄 한계는 약 200 ppm에서 80년대에는 8 ppm 수준까지이고 인, 황, 질소의 경우도 전반적

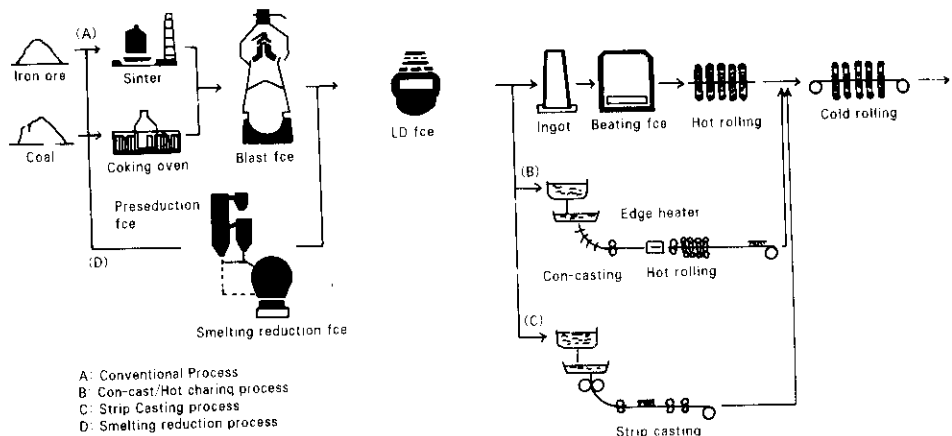
으로 100 ppm 수준에서 각각 10, 2, 10 ppm의 극한까지 제조가 가능하다. 향후 90년대 말에는 총불순물의 함량이 20 ppm 미만인 고청정강(ultra clean steel)을 제련하려고 꾸준히 노력하고 있다.

특히, 용강 중의 산소는 60년대에 약 40 ppm에서 90년대에는 약 8 ppm까지 탈산이 가능하게 되었다. 약 30 ppm을 줄이는 데 30 년이라는 세월이 필요했던 것이다. 용강 중의 산소는 응고시 금속 산화물을 형성하고 이 산화물은 주조시 생산성에 결정적인 영향을 미칠 뿐더러 주편의 표면 및 내부 결함을 일으키는 요인이 된다. 그러므로 고청정강을 제조하기 위해서는 용강 중 산소를 필연적으로 제어하여야만 한다.

**혁신 철강 제련 기술의 개발 동향**

현대의 철강 제련은 거의 완벽에 가까운 공정

**<그림 1> 철강 제련 기술의 변화**



- A: Conventional Process
- B: Con-cast/Hot charing process
- C: Strip Casting process
- D: Smelting reduction process

으로 발전되었으나, 공학적인 관점에서 보면 아직도 많은 단점들을 갖고 있는 원시적인 단위 공정들로 이어져 있다. 즉, 고로에서의 반응은 괴광 또는 소결광과 가스간의 반응이기 때문에 반응 속도가 느리며 爐況을 조절하기 위하여 원료의 복잡한 예비 처리 공정을 수반한다. 한편, 하부 계통에 이르기까지 배치 공정(batch process)으로 구성되어 있기 때문에, 모든 단위 공정간에는 레들(ladle)로 연결되어 공정의 자동화는 물론 열효율의 향상에도 제한을 받게 된다.

근년에 개발·개선된 공정의 대부분은 하부 계통의 연속화·자동화이며 상부 계통 즉, 제선, 제강 공정은 연속화와 자동화가 이루어지지 못하고 있어서, 앞으로 개발의 숙제로 안고 있는 문제이다(<그림 1> 참조). 따라서 철강 제련 기술의 현안 문제는 광석에서 최종 제품에 이르기까지의 연속 자동화에 초점이 맞추어질 것이며, 고품질화, 에너지 절약, 공해 규제에 대한 대응은 물론 고생산성을 위한 공정 개발에까지 그 노력이 집중될 것이다. 따라서 가까운 미래의 철강 제련 공정 개발의 방향은 일단 분체철광석과 일반 석탄을 전처리없이 직접 사용하는 용융환원제련법과 연속 주조와 열연 공장을 통합한 Strip casting이나 Thin slab casting이 될 것이다. 이러한 공정의 발전 방향은 기본적으로 다음의 목표에 초점이 맞추어질 것이다.

- 공정의 연속화 및 단순화
- 환경 규제에 대응할 수 있는 공정
- 광석, 연료 등 원료의 변화를 수용할 수 있는 공정
- 수요와 공급의 변동에 융통성있게 대처할 수 있는 공정
- 유해 불순물의 제어가 가능한 공정

#### 1) 용융환원제철법

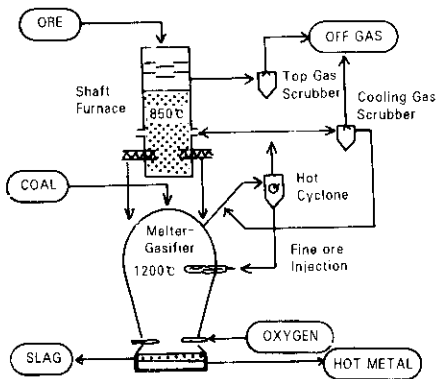
현재까지 용융환원제철법으로 많은 공법들이 연구·개발되어왔으며, 대표적인 공법은 일본의 DIOS법, 호주의 HIs melt법, 네덜란드의 CCF법, 그리고 근래 상업화에 성공한 오스트리아·독일의 COREX법 등이 있다. 이들 이외에 한국에서 COREX법을 개선한 FINEX법이 개발 중에 있다.

COREX법은 현재 유일하게 상업화에 성공한 용융환원제철법으로 오스트리아의 VAI社와 독일의 DVAI社가 공동 개발한 것이다. 1987년 12월 남아연방의 ISCOR社가 연간 30만 톤 규모의 상업화 설비를 준공하고 1992년 2월 정상 조업에 들어가게 되었다. 또한 POSCO는 1992년 12월 연간 용선 60만 톤 생산 규모의 CORES C-2000을 도입하여 용융환원제련의 기초를 마련하고 있다.

COREX법은 기본적으로 용융환원료와 샤프트형의 예비환원료로 구성되며 기능상 고로를 상부 환원대와 하부 용융대로 나누어 분리 조업하는 것과 같은 원리이다. 사용하는 철광

석은 괴광석으로 샤프트로에 장입하고 하부 용융환원로에서 발생하는 가스로 약 90% 이상 예비 환원시킨다. 다음 예비 환원된 광석을 용융환원로에 장입하여 용융 상태에서 환원시켜 용선을 제조한다. 환원제와 열원으로 사용되는 석탄은 일반탄으로 용융환원로의 상부로 장입되며 반응 중 발생하는 가스는 예비환원로에 공급하여 환원가스로 사용된다. <그림 2>는 COREX법의 개략도이다. 이 제련법은 코크스 오븐을 필요로 하지 않는 장점은 있지만, 철광석의 경우 8 mm 이상의 괴광만을 사용하여야 하는 원료에서 제약을 갖는다. POSCO의 FINEX법은 COREX법과 유사하나 샤프트로 대신 流動層爐를 갖고 있는 점이 다르다. FINEX법은 COREX법과는 달리 100% 분광석을 처리하는 것을 목표로 하기 때문에, 유동층로를 채택하여 광석의 예열, 예비 환원 및 최종 환원의 3단계를 거쳐

<그림 2> COREX 용융환원법



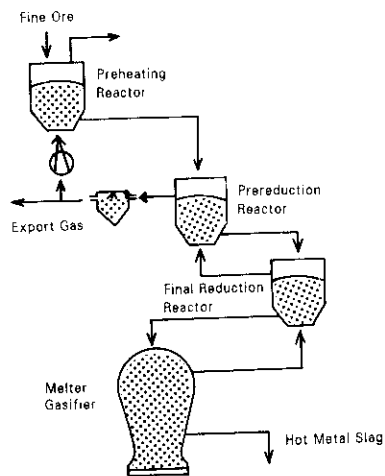
용융환원제련을 위한 장압광석을 처리한다. <그림 3>은 FINEX법의 개략도이다.

FINEX법은 기본적으로 기존의 제선 공정 즉, 고로, 코크스 오븐, 燒結工場에서 배출되는 환경 오염 물질의 배출량을 대폭적으로 감소시키는 특징을 지니고 있다. 특히, 강력한 공해 규제 대상인 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 배출이 기존의 공법보다 극히 낮으며 또한 煙塵 손실을 최소화할 수 있는 이점도 있다.

2) Mini-mills 제강 기술

최근 전기로 제강의 발전에는 여러 가지 요인이 있을 수 있으나, 강력한 공해 규제때문에 노후 철강 제련 설비를 보유하고 있으며, 고철이 다량 축적되어 있는 선진국의 경우 이의 해결책으로 전기로 제강에 관심을 돌리게 되었다. 전기로 제강은 설비 투자가 상대적으로 저렴하며 直流電氣爐, 연속 Thin slab

<그림 3> FINEX 용융환원법



casting 등이 실용화됨에 따라, 전통적인 일반 제철소에서만 생산이 가능하였던 열연코일, 냉연강판 등과 같은 판재류 제품을 생산할 수 있게 되어 경쟁력있는 제강법 즉, Mini-mills의 형태로 발전하게 되었다.

Mini-mills는 전적으로 고철을 원료로 하며 고철의 품위에 따라 제품의 질이 결정된다. 따라서 양질의 고철을 확보하는 것이 Mini-mills의 과제가 된다. 고철은 일반 제철소와 LD전로용으로 반분하여 소비되어왔기 때문에, 세계적으로 일관제철소의 증설과 신설이 이루어진다면 Mini-mills와 첨예한 고철 경쟁이 일어날 것으로 예측된다. 그러나 코크스 오븐에 대한 공해 압력과 CO<sub>2</sub>·SO<sub>2</sub>방출에 대한 규제가 세계적으로 대두되고 있기 때문에, 신철강제련법 즉, 용융환원제철법이 이미 개발·실용화되고 있으므로 고철에 대한 수요 공급 문제는 예측하기 어려운 상태에 있다.

현재 전기로는 자동화를 통한 전극 소모 감소, 조연 버너의 사용에 의한 전력 소비 절감, 슬래그포밍조업 (slag foaming operation), 고철의 예열을 통한 에너지 절감, 노가스의 對공해 처리 기술 등의 개선으로 보아 전기로 제강의 경쟁력이 향상되었다. 앞으로 전기로 제강의 발전 방향은 역시 배치 공정에서 연속 공정으로, 그리고 고가의 전력 소비를 절감시키는 방안의 강구에 초점이 맞추어질 것이다.

한편, Mini-mills이 기존의 일관제철법과 품

질 면에서 경쟁하려면, 고철의 선별을 통한 불순물의 효과적인 제어나 염가의 환원철을 안정하게 공급받을 수 있는 방법이 필연적으로 강구되어야 할 것이다.

### 3) Thin slab · Strip casting 기술

제강 과정에 있어서 우리가 해결해야 할 문제는 용강을 급속 냉각시켜 소재 중심부의 조직과 물리·화학적 성질을 개선하는 것이다. 고전적인 造塊法은 고질적인 금속학적 문제 즉, 偏析, 柱狀 組織, 기포 등의 발생으로 수율의 저하와 품질의 개선에 어려움이 있었다. 이의 해결 방법으로 대두된 것이 연속주조법이다. 연속주조법은 조괴법(ingot making)의 문제점들을 대부분 개선하였지만 아직도 만족할 만한 정도에 이르지 못하고 있다. 연속 주조에 있어서 혁신적인 발전은 Thin slab casting과 Strip casting이다. 이 두 주조법은 서로 다른 목적을 갖고 독립적으로 개발되고 있는 공법이다.

· Thin slab casting: 주조 두께 70~80 mm의 슬라브를 생산하며, 현대적 슬라브의 연속 주조와 열간 가공의 기술을 바탕으로 하여 개발되고 있다. 이 주조법은 Thin slab의 연속 주조압연 공정을 연결하여 자동화함으로써 양질의 판재를 저렴한 값으로 생산하는 데 목적을 두고 있다.

· Strip casting: 주조 두께 1~6 mm의 스킵

<표> Strip casting의 세계적인 개발 현황

회사	strip 두께(mm)	strip 폭(mm)	생산 제품	비고
BAPO(호주)/ IHI(일본)	2.0	1,900	보통강 스테인레스강	연간 10만 톤 시험조업
NSC(일본)/ Mits. (일본)	1.6~5.0	800~1,330	스테인레스강	연간 42만 톤 준공 계획
POSCO(한국)/ Daiv. (UK)	2.0~6.0	1,300	스테인레스강	1997년 상용화 계획

트립을 생산하며, 열간 가공 공정을 제거하고 직접 냉간 가공에 연결시킴으로써 품질을 개선하고 생산 단가를 절감시키는 데 목적이 있다. 이 구조법은 무정질(amorphous)의 금속 리본(ribbon)을 제조하는 기술이 근간을 이루고 있다.

이와 같이 고속 응고를 통하여 판재를 생산함으로써 금속학적 문제를 해결할 수 있기 때문에, Thin slab casting이나 Strip casting은 하나의 혁신적인 기술로 각광을 받고 있다. 특히, Mini-mills는 주 생산품이 판재이며 고철 가운데 황이나 구리와 같은 유해 원소를 급속 냉각을 통하여 편석없이 주조 조직에 균일하게 분산시킬 수 있는 가능성때문에 더욱 관심의 대상이 되고 있다.

세계적으로 Thin slab casting은 미국의 NUCOR社와 일본의 KAWASAKI Steel 등이 이미 개발 중에 있거나 상업화하고 있으며 국내에서는 한보철강이 최근 공장을 가동하고 있다. 한편, Strip casting은 우리나라의 POSCO도 이미 파일롯 공장의 규모로 성공한 바 있으며 세계적인 개발 현황은 <표>와 같다.

**결론**

철강의 대량 생산 방식으로 고로-LD전로로 구성되는 일관제철법이 정착되었으며, 철강 생산 기술의 발전은 공정의 연속화·자동화 및 설비의 대형화 등에 초점이 맞추어져왔다. 앞으로도 고로-LD전로법은 사회적 요구에 끊임없이 적응하면서 세계 철강 생산의 주역으로 그 임무를 계속 수행할 것이다. 그러나 선진 철강국의 설비 노후화와 함께 그 생산 비중은 계속 감소할 것이며 그 자리의 일부는 용융 환원 신제철 기술로 대체되고, 이와 병행하여 고철을 위주로 한 전기로 제강의 비중이 상대적으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 최근 선진 철강국을 중심으로 개발 중인 용융 환원제철법과 전기로 제강 분야에서 Thin slab casting 및 Strip casting 등의 혁신 기술들이 활발히 개발되고 있으며, 2000년대에는 실용화되어 철강 업계에 큰 변화를 가져오게 될 것이다. 결과적으로 판재류의 혁신 기술을 토대로 하는 Mini-mills는 앞으로 기존의 철강 제련사와 판재 분야에서 첨예한 경쟁 관계를 갖게 될 것으로 예상된다. ■