

# 주철의 역사

영남대학교 신소재공학부 권해욱

## 1. 초기 철 용해의 발달

인류와 철의 관계는 선사 시대로 거슬러 올라간다. 그리고 적어도 7천 년에 걸쳐져 있는 것으로 믿고 있다. 방울, 칼 날 및 장식용으로 박아 넣은 것과 같은 철 조각과 작은 철 제품이 기원전 5000년경으로 추정되는 이란 및 이집트의 고고학적으로 중요한 지대에서 발견되었다. 최초로 철을 제련한 증거는 기원전 1700 ~ 1400년경으로 추정되는 소아시아의 히타이트족의 발굴 지대에서 발견되었다. 그러나 이것이 이 지역에서 제철이 시작되어 다른 지역으로 전파되었다는 것을 뜻하는 것은 아니다.

역사에 의하면 주철은 기원전 800 ~ 700년경에 중국인들이 처음으로 성공적으로 생산하였다. 그 이전에는 노로부터 필요한 온도를 얻을 수 없었기 때문에 주조할 수는 없었다. 그러나, 중국인들은 그때까지 가능했던 것보다 통풍이 더 잘되게 할 수 있는 용해 설비를 개발하였다.

중국인들이 성공적으로 주철을 생산할 수 있었던 또 다른 이유는, Simpson이 언급한 바와 같이, 그들이 목탄을 사용하여, 과잉이 탄소가 존재하는 조건 하에서 가열하여 철광석을 환원하였다는 것이다. 이와 같은 공정으로 용점이 약 1530°C인 연한 순철을 얻었다. 그리고 이 철은 탄소 함량이 증가하여 용점이 1170°C로 떨어져서 그들이 사용한 높은 굴뚝형의 노 내에서 쉽게 용해되었다.

다른 문헌에 의하면 중국인들은 장입물로 인 함량이 높은 철광석과 함께 인 함량이 높은 석탄은 사용하였다. 이와 같은 원료를 사용하여 용점을 낮추어 철을 용해하는 데 필요한 송풍량을 감소시켰다.

이와 같이 오래전 옛날부터 주철에 대한 관심이 증가하였다. 이와 같은 새로운 주조용 금속을 조형 기술의 발달과 더불어 용해 설비와 기술의 발달로 다양하게 응용할 수 있었다. 서기 56년에 중국인들이 처음 건설한 주철제 체인 연결 현수교와 같은 것을 포함하여, 주철을 오랜 기간동안 여러 공업 분야에서 응용하였다. 그러나 서기 4세기경에 와서야 유럽에서는 일반적으로 상당한 양이라 할 수 있을 정도로 주조하였다.

## 2. 용광로의 발달

철을 용해하기 위한 초창기의 노는 매우 조악한 용광로 형태였지만, 서기 8세기에 스페인의 카탈란 제철소(Catalan forge)에서 개발한 것이 최초의 용광로인 것으로 생각된다. 카탈란 제철소에서는 철광석과 목탄을 꼭대기에서 수직으로 장입하여 철 덩어리를 얻었다. 이를 갈고리로 끌어내어 해머를 사용하여 불륨으로 단조하였다. 그 이후 서기 1000년경에 독일과 스웨덴의 기술자들이 진정한 의미의 용광로를 개발하였다.

그 이후의 300년의 기간동안 이와 같은 초기의 용광로가 개선되고 더 커졌다. 서기 1325년에 수력 송풍기가 도입되어 충분히 송풍하여 용광로로부터 직접 고온의 용탕을 얻을 수 있었다. 이와 같은 송풍기의 개발로 서기 1400년에 유럽에서 충분한 량의 선철을 생산하게 되어 현대의 주철 주물 생산이 시작된 것으로 기록되었다.

## 3. 용제 사용을 통한 초기 주철의 품질 개선

16세기에 그 유명한 스페인의 무적 함대가 영국 침공을 시도하였을 때 주철의 품질 개선면에 있어서 중요한 한 단계의 발전이 있었다. Colin Martin이, 영국 해변에서 먼 바다에 묻혀 있는 무적 함대의 난

파선을 발굴하기 위하여 조직된 탐험대에 관한 그의 역사적인 책(Full Fathom Five)에서, 스페인 함대의 주철 대포, 포환 및 닳은 영국에서 사용한 것들보다 나빴다는 것을 지적하였다. Martin은 영국이 스페인을 패퇴시켜 영국 점령을 막은 중요한 한 가지 이유로 이와 같은 사실을 언급하였다. 비록 스페인이 품질이 좋은 철광석을 보유하고 있었지만, 그들은 주철의 거동에 대한 지식이 부족하여 생산한 주철 대포, 닳 및 포환의 품질이 나빴다.

광석을 제련하여 용제를 첨가하고, 제련한 후 정련하고, 조형하고 주조하는 기술에 있어서 스페인 사람들이 영국 사람에 비하여 매우 뒤떨어져 있었다는 역사적 증거가 있다. 실제로 그들이 생산한 주철 주물에는 슬래그가 들어 있었다. 폭발 잠재력이 큰 화약의 폭발력과 함께, 포환의 품질이 나쁘고 취성이 커서 포환이 목표물에 도달하기 전에 균열이 발생하고 깨졌다. 마찬가지로, 많은 주철 대포가 발사하는 동안 파열되었으며 이것은 강도와 충격 및 진동 흡수 능력이 나쁘다는 것을 나타낸다. 이와 같은 이유로 스페인 함대의 닳은 깊은 바다의 용력하에서 파괴되어 많은 배들이 난파되는 원인이 되었다.

대륙의 경쟁자들이 질투하게 된, 영국 주철의 우수성의 이유는 무엇이었을까? Martin은 마술적인 제조법은 없었다는 것을 지적하였다. 그 시대의 영국 산업 단지인 16세기 남부 영국의 주조 공장의 모든 공정은 잘 알려져 있다. 몇 달 동안 공석을 방치하여 많은 불순물을 씻겨 나가게 하였다. 그리고 광석을 분쇄하고 다시 세척하였다. 광석 내에 존재하는 회색의 조개 화석이 제련하는 동안 좋은 용제 역할을 하여 용탕 표면 드로스와 다른 개재물을 제거하였다.

이 시대의 영국의 주조 공장의 지식은 대포와 포환 주형을 건조하고 주철을 주조하기 전에 가열할 정도로 우수하였다. 그리고, 용탕을 매번 가능하면 균일한 온도에서 주조하였다. 이와 같은 방법으로 우리가 과냉이라고 일컫는 현상을 최소화하고 응고 조직을 평형에 가깝게 하였다.

주입한 후, 주물을 주형 내에서 상온으로 점점 냉각되게 하였다. 이와 같은 방법으로 최종 주물 내의 용력을 최소화하였다. 한편, Martin이 지적한 바와 같이, 스페인 사람들은 생산성을 향상시키기 위하여 가능한 한 빠르게 주물을 냉각되게 하였다. 그들은 자주 주물을 물 쾅칭하였으며 이것은 용력과 균열 발생의 원인이 된다.

스페인의 무적 함대가 패퇴한 몇 년 뒤에 대륙의 주조 공장에서 영국 주물의 품질이 더 좋은 이유를 밝히려고 하였다. 1619년에 네덜란드 사람인 Jan Andries Moerbek이 남부 영국의 철광석을 사용하여 12년간의 특허를 신청하여 얻은 새롭고 획기적인 주철 주조 기술을 개발하였다. 용제가 내재하는 영국 철광석과 용제가 없는 좋은 품질의 철광석을 비교하여 그 네덜란드 사람은 용제로 석회석을 사용하는 방법을 개발하였다. 이 새로운 기술은 독일, 프랑스 그리고 궁극적으로 스페인까지 대륙으로 전파되어 갔으며 공업 주철의 개발에 중요한 공헌으로 인정받았다.

#### 4. 주철 제조 공정의 발전

1730 년에 영국의 주철 주조 기술자인 Darby라는 사람이 인정한 그 다음의 중요한 발전은 주철 생산 원가를 감소시킨 코크스의 발견과 생산이다. 이와 같은 발전으로 기계적 성질이 개선된 품질이 더 좋은 주철 생산이 가능하게 되었다. 결과적으로, 프랑스의 주물 기술자들은 다른 더 작은 노에서 선철의 재용해를 시도하였다. 이와 같은 형태의 정련으로 화학 조성면에서 더 균일한 주철 용탕을 얻었으며 공업용 등급의 주철을 개발하기 위한 또 다른 한 단계의 큰 발전이었다. 이 때까지, 분명히 용광로부터 얻은 용탕을 직접 주입하여 대부분의 주철 주물을 얻었다.

별도의 노에서 선철을 재용해하여 품질이 개선된 주철을 생산하여 Jame Watt가 1765년에 최초의 증기 기관을 제조할 수 있게 되었다. 그리고 Watt의 증기 기관을 사용하여 John Wilkinson이 1794년에 최초의 큐플라를 건설하여 송풍하여 가동하게 되었다. 송풍량을 조절하여 큐플라 내의 용해 온도가 더 높아져서 주철의 품질이 더 개선되었다. 결과적으로 설계자, 기술자, 건설 관계자 및 다른 사람들이 공업적 재료로서 주철에 더욱 관심을 가지게 되었다.

육상 및 해상 운송, 농업용 기계 그리고, 나중에, 전력 생산과 같은 분야에 증기 기관을 적용함에 따라 대량의 고품질 회주철의 수요가 창출되었다. 이와 같은 수요가 증대됨에 따라, 더 효율적인 용해 설비, 개선된 장입 재료 및 용해 공정의 엄밀한 제어가 필요한 더 높은 강도의 고품질 주철의 생산의 수요가 증대되었다.

## 5. 페로실리콘의 초기 사용

약 1810년경에 스웨덴의 화학자 Bergelius와 독일의 물리학자 Stromeyer는 각각 별도로 페로실리콘을 생산하였다. 산화 규소, 탄소 및 철 충전재의 혼합물을 밀폐된 도가니에 내에서 용해하였다. Stromeyer는 이와 같은 방법으로 다양한 등급의 페로실리콘을 생산하였다.

비록 페로실리콘을 사용한 방법에 대한 기록은 없지만, 아마 용해로에 첨가하였을 것이다. 주철 주물 기술자들은 사용한 철광석 중 일정하지 않은 규소 함량의 차이 때문에 규소의 원천에 대하여 주로 관심을 가지게 되었다. 고 규소 함량으로부터 더 연하고 취성이 더 작은 주철을 제조할 수 있는 장점은 명백하다. 고철과 선철로 구성되는 장입물과 함께 노에 규소를 첨가하여, 주물 기술자들은 좋은 품질의 주철을 일관성있게 제조할 수 있었다. 그들은 곧 두꺼운 주물에는 규소함량을 낮게 그리고 얇은 주물에는 규소 함량을 높게하는 것이 이롭다는 것을 알게 되었다. 19세기 초에서 중반에 이르기까지 페로실리콘을 레이드에 첨가하는 것이 알려지지 않았다.

1885년에, Turner는 백주철에 페로실리콘을 첨가하여 고 품질의 회주철 주물을 제조하기 위한 실험을 하였다. 레이드 중의 용탕에 페로실리콘을 첨가하였다고 가정하는 것이 합리적이다. 그렇다면, 이것은 일부의 초기 연구자들이 레이드에 페로실리콘을 첨가 하는 것이 철을 감소시키는 잠재력이 있다는 것을 인식하였을 것이라는 증거가 될 것이다.

1920년에 G. Schury가 큐폴라 내에 페로실리콘 브리케트(briquette)를 사용하는 것을 토론했었다. 이 논문의 토론자는 주철의 성질을 개선하기 위하여 1890년과 같이 규소 함량 조절에 관한 지식이, 현재 까지 계속되고 있는 생산 공정인, 주철의 조직과 기계적 성질의 또 다른 일련의 개선의 계기가 되었다.

## 6. 전기 용해로의 발전

19세기에 여러 사람이 전기 아아크를 주철 용해에 적용하였다. Humphry Davy 경이 1810년에 실험을 하였으며 Pepys가 1815년에 전기 용접에 관하여 연구하였다. 그리고 1878 ~ 1879년 기간에 William Siemens가 아아크 형태의 전기로에 대한 특허 등록을 하였다. 1907년에 프랑스의 Paul Heroult가 처음으로 아아크 전기로를 개발하였으며 미국에서 상업적 공장을 건립하였다. 2차 세계 대전 이래로 합금강 제조를 위하여 아아크 형태의 전기로가 널리 채택되었다.

1910년대에 프린스턴 대학의 실험실에서, 연못의 물결이 시작 되는 것처럼, 유도로 용해가 시도되었다. 처음 시도한 사람은 Edwin Northrop이라는 50대의 물리학 교수였다. 그리고 1960년대에 미국에서 널리 채택하게 되었다. 유도 용해로의 채택으로 주철 주조공정에서는 완전히 새로운 용해기술이 되었다. 화학 조성과 온도 조절이 더 용이하고 장입 재료의 문제가 더 적고 다양한 합금을 생산할 수 있으며 노동력 및 조업 중단 시간을 단축 시킬수 있었다.

## 7. 다양한 주철의 개발

일반적으로 주철은 취성이 큰 재료이다. 따라서 여러 사람들이 주철의 기계적 성질 개선을 시도하게 되었다. 1722년 프랑스의 Reaumar가 백주철을 표면 탈탄시켜 백심가단주철을 제조하였다. 한편 미국의 Seth Boyden은 백주철을 약 900°C의 온도에서 1 차 그리고 약 700°C의 온도에서 2 차 어닐링하여 시

멘타이트를 분해하고 흑연화하여 괴상 또는 구상 흑연을 석출시킨 흑심가단주철을 개발하였다. 이와 같은 재료는 인장 강도도 크고 연신률이 어느 정도가 되었으므로 주철의 결점을 보완하는 역할을 하였다. 그러나 이 재료를 생산하기 위해서는 고온에서 긴 시간동안 가단화 처리하여야 한다.

20세기 전반의 기간 동안 회주철과 가단주철이 크게 발전하였으나, 주조기술자들은 주방 상태에서 가단주철과 동등하거나 가단주철보다 더 우수한 주철을 제조하기 위한 연구를 계속하였다. 1943년의 미국주물인협회(AFS)의 기술 강연 대회에서 J. W. Bolten이라는 사람이 다음과 같이 언급하였다.

“여러분은 한 가지 의문을 제기 할 수 있는 특권을 부여 받았다. 회주철 중의 흑연 형상조절을 실현할 수 있을 것인가? 편상 흑연 대신에 가단주철의 흑연과 비슷한 형상을 가지는 재료를 현실화할 필요가 있다.”

그리고 몇 주일 뒤, International Nickel Co. 실험실에서, Keith D. Millis는 구리-마그네슘 합금으로서 마그네슘을 레이드중의 주철 용탕에 첨가하여 Bolten의 낙관적인 예견을 정당화하였다. 즉 편상이 아닌 거의 완전한 흑연이 들어 있는 주물을 얻었다. 구상흑연주철이 탄생한 것이다.

5년뒤, 1948년의 AFS 기술강연대회에서, British Cast Iron Research Association의 Henton Morrogh가 적은 량의 세륨을 과공정 회주철 용탕에 첨가하여 성공적으로 구상 흑연을 얻은 사실을 발표하였다. Morrogh가 이를 발표한 시기에, 1943년에 Millis가 발견한 것을 시작으로, 흑연 구상화제로서 마그네슘 개발 제품에 관하여 발표하였다. 그리고 1949년 10월에 특허 등록되었으며 이것이 구상흑연주철의 공식적인 탄생이다. 그리고 그 이래로 크게 발전하게 되었다.

C. V. 흑연은 오랫동안 알려져 있었다. 편상 및 구상 흑연과는 다르며 이 두 가지 형태의 중간 정도의 형상을 가지는 흑연이다. 이것은 구상흑연주철을 생산하는 과정에서 구상화 처리가 부족하였거나 구상화 처리한 후 페이딩이 일어나 바람직하지 못한 흑연의 변형인 것으로 간주되었다. C. V.흑연을 가지는 주철의 특성과 사용에 대해서는 1955년에 Estes와 Schneidewind가 처음 제안하였으며 그 이후 1966년에 Schelleng도 제안한 바 있다. 이 주철의 사용에 대해서는 1970년대에 많은 연구가 있었다.

구상흑연주철의 오스템퍼링 처리를 처음 시도한 것은 1950년대 중반이었으나 1970년대 중반 이후에 와서 실제로 적용되어 오스템퍼드 구상흑연주철(ADI) 대량 생산되기 시작하였다. 미국의 GM사가 자체 개발한 하부 베이나이트 형 ADI를 자사 승용차의 후륜축 하이포이드 피니언 및 링 기어에 적용한 이래로 ADI에 대한 관심이 매우 커졌다. GM사에서는 ADI의 성능이 우수하여 종래의 칩단 열처리한 단조강 부품을 경제적으로 대체할 수 있다고 발표하였다. 이와 거의 같은 시기에 트럭의 후륜 기어로 사용한 사실을 중국이 발표하였다. 그 이후 주철 산업을 주도하는 대부분의 나라에서 ADI의 개발 및 응용에 관한 연구를 하였다. 1984년과 1986년에 개최된 ADI 국제회의(International Conference)에서 이와 같은 관심도가 잘 나타났으며 ADI의 중요성은 다른 재료의 대체 재료로서 널리 인식되었다.