

분석 기술의 발달이 밝힌 인류 역사의 미스터리 - 금속을 어떻게 만들 수 있게 되었을까?

이 경 우 (서울대학교 재료공학부 교수)

인류는 지금부터 6000년 정도 전에 산화구리 광석을 제련해서 구리를 만들어 내면서 석기 시대를 벗어나서 금속을 사용하는 시대로 발전하게 되었다. 그런데 광석과 금속 구리는 모양이나 성질이 전혀 다르다. 비록 금속을 만들어 낼 수 있지만 광석은 글자 그대로 돌의 하나이고 겉보기에 나중에 만들어지게 되는 금속과는 전혀 다르다.

지금은 광석을 포함한 돌이 금속과 산소 또는 금속과 황의 화합물이라는 것을 알고 있고, 이 화합물에서 산소 또는 황을 제거하면 금속이 만들어진다는 것을 알고 있지만 처음으로 금속을 만들었던 수천 년 전의 선조들은 19세기에나 발견된 산소의 존재를 알 수 없었기 때문에 광석이 금속의 산화물이라는 것을 상상도 할 수 없었을 것이다. 따라서 다른 계기가 없었다면, 일반적인 돌과 약간 다르긴 하지만 그래도 돌의 하나인 광석에서 모양과 성질이 전혀 다른 금속을 만든다는 생각을 해내는 것은 거의 불가능한 일이었을 것이다.

발전한 정밀 분석 기술은 수천 년 전의 제련 기술자들이 어떻게 광석에서 금속을 만들 수 있었는지 추론할 수 있는 단서들을 제공했다.

처음으로 구리를 만들어 낸 문명은 메소포타미아 지역에 존재했고, 이 지역의 여러 금속 유물, 고대 광산 그리고 고대 제련 장소에 대한 분석이 진행되면서 최초의 제련 기술에 대한 윤곽이 잡히기 시작한 것이다.

현재까지 발견된 고대 구리 제련로와 제련으로 만들어 냈을 것으로 추정되는 구리 유물에 대한 분석 결과를 보면 6000년 정도 전에 구리 제련이 시작되었다는 것이 정설로 받아들여지고 있다. 그런데 종종 더 오래된 유적에서 구리 유물이 출토되고 있어서 구리 제련이 더 일찍 시작되었을 수 있다는 주장도 나오고 있고, 심지어는 인류가 최초로 사용된 것으로 알려진 금보다 구리가 먼저 사용되었을 가능성을 보여주는 유물도 발굴되고 있다. 다만 이렇게 오래된 유적에서 얻어진 구리 유물들은 구리 광석을 제련해서 만들어진 것이 아니고 자연이 만들어 낸 천연구리(native copper)를 모아서 가공한 것으로 밝혀지고 있다.

천연구리가 자연계에 존재하는 이유는 구리 산화물의 환원이 다른 금속보다 상대적으로 쉽다는 구리의 화학적 성질 때문이다. 구리 산화물이 탄소와 같이 있으면 높지 않은 온도에서

환원되어 구리가 될 수 있어서 구리 광석이 산 불에 노출되거나 지질 작용을 받아서 온도가 높아지면 구리로 환원될 수 있다. 인류는 구리를 만들기 전에 이 천연구리를 모아 가공해서 장신구 등을 만들어 사용했다. 이 때문에 아주 오래된 유적지에서도 구리 유물이 발견되고 있으며, Solecki 교수는 기원전 8000년 정도로 추정되는 유적에서 구리 유물을 발견해서 인류는 금보다 구리를 먼저 사용했다고 추정했다¹⁾.

다만 이렇게 얻어진 구리는 주로 장신구로만 사용되었기 때문에 구리 합금이 도구로 문명을 발전시킨 청동기 시대와는 관계가 없다. 그런데 바로 이 천연구리 덕분에 구리를 만드는 아이디어를 얻어서 인류 문명이 청동기 시대를 맞이하게 된 것으로 보인다. 모든 구리 광석은 구리 성분 외에 여러 불순물이 같이 들어 있는데 그 양들이 광산에 따라 조금씩 다르다. 그리고 과거에는 금속을 만들 때 불순물을 없애는 기술이 부족했기 때문에 광석의 불순물들이 대부분 만들어진 구리에 남아 있어서 구리 유물 속의 불순물을 정확하게 분석하면 마치 지문처럼 그 금속을 만든 광석이 어느 광산에서 나온 것인지 알아낼 수 있다.

이러한 분석을 통해서 천연구리 역시 광산에서 채취된 것을 알게 되었다. 예를 들어 Muhly

교수는 터키 남동부에 위치한 차요뉴 테페시(Çayönü Tepesi) 지역의 기원전 7000년경의 신석기 유적 중에 발견된 50개가 넘는 구리로 만든 공예품들에 사용된 구리를 분석해서 이들이 천연구리이며 그 지역에서 20km 정도 북쪽에 있는 에르가니 광산(Ergani Maden)에서 채취된 것을 밝혀냈다. 천연구리가 구리광산에서 만들어지는 것은 놀라운 일이 아니다. 노출된 구리 광석이 산불에 휩싸이게 되면 제련에 필요한 높은 온도가 만들어지고 나무에서 구리를 환원시켜 줄 탄소가 공급되기 때문에 구리가 만들어질 수 있어서 구리 광산 위의 산불은 자연 제련로라고 할 수 있다. 지구상에서 산불은 육상 식물이 나타나기 시작한 4억년 전의 대분기부터 시작되었기 때문에 인류가 나타나기 훨씬 전부터 지구 곳곳에 산불이 만들어 낸 천연 구리가 존재하고 있었다. 인류가 처음 사용한 제련로의 모습도 산불과 유사하게 구리 광석과 나무를 섞어 놓고 나무에 불을 붙여서 만들었다. 이렇게 유사한 것은 우연이 아니고, 아마도 초기 제련 기술자들이 산불이 구리를 만드는 과정을 모방했기 때문일 것이다.

그렇지만 광산에서 천연구리를 채취하던 사람들이 구리의 아래에 있는 돌이나 흙에서 구리가 만들어진다는 생각을 해내고 그 광석을 가져다가 구리 제련을 했을 가능성은 높지 않

1) 최초로 사용된 금속이 금인지 구리인지에 대해서 논쟁하는 것은 큰 의미가 없고 지역에 따라 다를 것이다. 그 이유는 금과 천연구리는 인류가 존재하기 전부터 자연계에 금속으로 존재했기 때문에 지역에 따라서 쉽게 얻어지는 것을 먼저 사용했기 때문이다. 그리고 자연적으로 발견된 것을 그대로 사용한다면 얼마든지 오래된 유물이 발견될 수 있기 때문에 앞으로 계속 더 오래된 금이나 천연구리 유물이 발견될 것으로 보인다.

다. 광석에서 구리를 만들기 위해서는 높은 온도와 탄소 공급원이 필요하기 때문이다. 이론적으로는 탄소가 있으면 300도를 넘는 온도 조건에서 구리가 만들어질 수 있지만 그래도 사용할 만한 구리를 만들기 위해서는 800도 이상의 온도가 필요하며 산불 중에서도 크라운 산불이라 불리는 나무줄기나 뿌리까지 천천히 타들어 가는 산불이 이러한 온도를 만들 수 있다. 그런데 신석기 시대의 선조들에게 800도 이상으로 온도를 올리는 제련로를 만드는 것은 많은 노력과 자원이 필요한 큰 작업이기 때문에 그 광석에서 금속을 만들 수 있다는 것을 확인할 수 없었다면 구리 제련로를 만들어서 구리를 만들려는 시도를 할 수 없었을 것이다.

어떻게 구리 광석에서 구리가 만들어진다는 확신이 들었는지를 보여줄 수 있는 자료들은 없지만 앞에서 설명한 대로 천연구리의 채집되었던 장소가 나중에 구리를 만들 때 구리광산이라는 사실에서 다음과 같은 추론을 할 수 있다. 인류가 천연구리를 채집하던 장소에 큰 산불이 났는데, 그 이후에 다시 가보니 갑자기 천연구리가 많이 만들어져 있는 것을 반복적으로 경험하면서 불이 나면 천연구리가 만들어지는 곳으로 먼저 가서 구리를 채집하려고 했고, 어쩌다 일찍 도착했을 때에 구리가 만들어지고 있는 과정을 관찰할 기회가 생겼을 가능성이 있다. 이러한 경험이 축적되면서 구리광석-불-구리의 연관성을 생각해 냈을 것이다. 큰

산불이 자주 나는 것은 아니기 때문에 이 과정이 한순간에 일어난 것은 아니고 몇 세대에 걸친 경험 누적의 결과일 것이며, 800도 이상의 온도에서 작업할 수 있는 제련로를 만드는 것도 쉬운 일이 아니었기 때문에 천연구리를 사용한 후에도 수천 년이 지나서야 구리를 만들 수 있었다.

초기에는 구리를 만들기 가장 쉬운 구리 산화물(Cu_2O)광석이나 가열하면 쉽게 산화물로 바뀌는 광석(CuCO_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, $2\text{CuCO}_3\text{-Cu}(\text{OH})_2$)에서 구리를 만들었다. 이 시기에 만들어진 구리는 강도가 돌에 비해서 그렇게 크지 않았고, 그래서 귀한 재료였던 구리는 주로 장신구나 의례용 도구로 사용되고, 작업을 위한 도구로는 석기가 사용되었다고 추정하는 고고학자들이 많다. 그런데 이 시기에 생산된 구리의 양이 상당히 많다. Muhly 교수의 추정에 의하면 당시 유명한 구리광산이었던 아이 부나르(Ai Bunar) 광산에서 채굴된 광석이 2500톤 정도이고, 이를 사용해서 만들어진 구리가 750톤 정도에 이른다. 이러한 생산량은 장신구나 의례용으로만 소비되기에는 많은 양이다. 이 생산량으로 보면 비록 이 시기의 구리가 돌보다 강하지 않아도 구리는 금속이므로 쉽게 깨지지 않아 무기나 내구성이 필요한 도구로서의 장점이 있기 때문에 이 시기에도 구리가 도구나 무기로도 사용되었을 가능성이 상당히 높다는 것을 보여준다².

2) 다만 이 시기에 구리가 도구로 사용된 유물이 별로 발견되지 않는데, 그 이유는 도구로 사용된 구리는 망가지더라도 녹여서 새로 만드는 주조가 어렵지 않아서 계속 재활용되었기 때문으로 추정된다.

이렇게 구리가 많이 생산되자 광석 소비량이 늘어 청동기 시대가 시작되기도 전에 제련하기 쉬운 구리 광석들은 고갈되기 시작했다. 산화광이 고갈된 광산 아래쪽에는 구리와 황의 화합물인 황화광(Cu_2S , CuFeS_2 등)이 많이 남아 있었지만 산화광을 처리하던 장치로는 황화광을 구리로 만들 수 없었다. 그 대신 비소가 들어간 광석($\text{Cu}_2\text{AsO}_4 \cdot \text{OH}$)을 사용해서 구리를 만들기 시작했는데 이 광석 속에 들어 있는 비소가 구리 속에 용해되면서 구리의 강도를 높여 주는 의도하지 않은 결과를 얻으면서 구리로 만든 도구들이 좋아졌고, 도구의 숫자도 늘어나면서 본격적으로 인류 문명이 빠르게 발전하기 시작했다.

구리에 대한 수요가 계속 늘어나면서 비소가 포함된 광석만으로는 공급이 모자랐다. 제련 기술자들은 매장량이 많은 황화광을 제련해서 사용할 공정을 찾으려 노력하다가 황화광을 대기 중에서 높은 온도로 가열하면 황과 구리가 산소와 반응해서 황은 이산화황이 되고, 광석은 산화물로 바뀌는 것($\text{Cu}_2\text{S} + 1.5\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2$)을 알게 되었다. 이렇게 만들어진 산화광은 기존 제련 장치에 투입할 수 있었기 때문에 드디어 황화광을 자원으로 사용할 수 있게 되어 자원 부족 문제가 많이 해소되었다.

그런데 이렇게 만든 구리 금속은 비소가 적기 때문에 구리-비소 합금에 비해서 강도가 약한 것이 문제였다. 만일 비소의 존재와 역할을 알

았다면 비소를 제련해서 별도로 첨가하면 되었겠지만, 당시에는 비소의 존재를 알지 못했기 때문에 쉽게 해결하기 어려운 문제였다. 제련 기술자들의 지속적인 노력 끝에 주석이 구리의 강도를 높인다는 것을 알아내서 주석을 첨가한 청동을 만들었다³. 사실 구리를 강화시키는 효과는 비소가 주석보다 더 크다. 예를 들어서 비소와 주석이 각각 2%씩 구리에 포함되면, 비소는 구리의 강도를 30% 정도 높이지만 주석은 10% 정도 높일 뿐이다. 다만 비소는 4% 이상 첨가되면 더 이상 효과가 없는데, 주석은 10% 이상 첨가해도 계속 강도가 높아지기 때문에 주석이 많이 들어간 청동이 비소가 들어간 합금보다 더 우수한 성질을 가지게 만들고 있고, 주석이 10% 또는 그 이상 들어간 청동이 시대의 주재료로 자리를 잡게 된다.

인류가 철을 어떻게 만들 수 있었는지도 수수께끼이다. 철을 만들기 위해서는 구리보다 훨씬 높은 온도가 필요하기 때문에, 철은 구리와 달리 자연적으로 만들어지는 것은 거의 없다. 다만, 인류는 철을 만들기 전에 운석으로 떨어진 운석철을 가공해서 사용했다. 권오준 박사의 자료 조사에 의하면 철을 부르는 iron이라는 이름의 의미가 “하늘에서 온 것”이라는 뜻이라고 한다. 이는 그 당시 인류는 철은 만들 수 있는 것이 아니고 하늘의 선물로 인식했다는 것을 보여준다.

3) 그런데 광석 중에 불순물로 포함되어 있던 비소나 납과는 달리 주석 성분은 구리 광석과 같이 나오지 않기 때문에 어떻게 구리에 주석을 넣어서 강한 재료인 청동을 만들 생각을 했는지 합리적인 설명은 아직 못하고 있다.

그래서 좋은 품질의 청동이 잘 만들어지고 있던 시기에 왜, 그리고 어떻게 하늘의 금속인 철을 인간이 만들기 위해 제련을 시작하게 되었는지 설명하는 것이 쉽지 않았다. 특히 철을 제대로 만들기 위해서는 적어도 1300도의 온도를 확보해야 하고 이 온도에서 만들어진 고체 상태의 철을 가공하는 것도 어렵다. 더구나 초기에 만들어진 철의 강도는 같은 시기에 만들어지던 청동에 비해서 나은 것이 없기 때문에 여러 어려움을 극복하면서 굳이 철을 만들 이유가 없어 보인다.

이 이유 역시 최신의 분석 기술들과 과학적 지식을 바탕으로 거의 밝혀져 가고 있다. 기원전 2000년부터 철기 시대로 본격적으로 접어들기 시작한 기원전 1500년 사이의 기간에 여러 유적지에서 운석철이 아닌 철이 종종 발견된다. 이 유물들은 철만 나오기도 하지만 철과 구리가 같이 나오는 예도 많다. Maddin 교수는 이러한 발굴 결과와 제련 지식을 더해서 다음과 같은 가설을 제시한다.

청동기 시대가 성숙기에 들어선 기원전 2000년에는 철산화물이나 철황화물이 포함된 구리 황화물 광석을 제련해서 구리를 만들었다. 당시의 제련 온도가 1100도를 넘었기 때문에 구리는 액체 상태로 얻을 수 있었고 슬래그(slag)와 쉽게 분리되었다. 그런데 이때의 제련 조건을 분석해 보면 구리가 환원될 때 철도 같이 환원될 수 있는 조건이 되었기 때문에 철이 종종 만들어졌다. 다만 이때 만들어진 철은 스펀지처럼 구멍이 숭숭나 있고 그 구멍을 슬래그가 채우고 있었다. 이렇게 금속과 슬래그가 섞여

있으면 단조 과정에서 철이 조각조각 나기 때문에 사용할 수 없는데, 이것을 1150도 이상의 온도에 두면 슬래그가 액상으로 바뀌고, 이 상태에서 단조를 하면 슬래그가 빠져나가면서 철을 얻을 수 있었다. 이 경험에서 발전해서 철을 제련하고 가공할 수 있게 되었다.

이 내용을 이해하기 위해서 먼저 구리 광석의 변화를 알아야 한다. 앞서서도 설명했지만, 처음에는 산화광이나 탄산구리 또는 수산화구리와 같이 제련하기 좋은 구리 광석을 사용했고, 그 이후 비소가 들어간 광석을 사용했다. 그렇지만 늘어나는 수요를 공급하기 어려워져 황화광을 사용하는 방법을 찾아내서 황화광을 사용해서 구리를 만들기 시작했다. 그런데 황화광 중에서도 구리의 함유량이 높은 휘동석(Cu_2S)은 빠른 시기에 고갈되었기 때문에 청동기 후기로 오면 철을 포함하고 있는 황동광(CuFeS_2)을 구리 제련의 주원료로 사용할 수밖에 없었다.

광석 속의 철 성분이 제련 과정에서 철로 환원될 가능성은 항상 존재한다. 다만, 높지 않은 온도에서는 철의 환원이 어렵기 때문에 구리가 다 환원되기 전에 철의 환원은 거의 일어나지 않는다. 따라서 구리를 얻고 난 다음에도 철 산화물은 다른 성분들과 함께 슬래그로 불리는 찌꺼기로 남는다. 그런데 청동기 시대 후반으로 가면서 숯의 품질이 좋아지고, 송풍 방법이 개선되면서 노의 온도가 높아지자 상황이 달라진다. 당시 송풍은 공기를 발로 불어 넣는 방법을 썼는데, 이 방법으로는 공기가 일정하게 들어갈 수는 없고, 많았다 적었다 하는

변동이 생긴다. 그런 중에 어쩌다 공기가 아주 많이 들어가게 되면 제련로의 온도가 올라가고, 산소량도 충분해져 철이 환원될 수 있는 조건이 만들어진다. 이 때문에 가끔 철이 구리와 함께 얻어지게 된다. 다시 말해 제련 온도가 전체적으로 상승하면서 구리와 함께 철이 만들어지기 시작했다. 이렇게 구리 제련 과정에서 철을 얻는 경험이 있었기 때문에 철을 만들 필요가 생기면 본격적인 철 제련이 가능했다는 것이다. 초기에 철기를 만들기 시작한 지역이 구리 제련이 활발한 지역이었다는 사실도 이러한 추정을 뒷받침한다.

다음으로는 철이 만들어진 필요성에 대해서 알아보자. Muhler 교수의 분석에 의하면 메소포타미아 지역에 대한 분석 결과, 철기 시대가 시작되던 시점의 철은 청동에 비해서 강도에 큰 차이가 없었다. 게다가 청동은 주조나 단조 등 가공이 쉽지만 철은 가공이 어려웠다. 이런 상황에서 왜 철기 시대로 넘어갔는가에 대해서 크게 세 가지 의견으로 나뉜다. 하나는 철이 청동보다 성질이 우수하기 때문에 당연히 철기 시대로 전환되었다는 것이고, 두 번째는 청동을 만들 수 있는 주석의 공급이 부족해지면서 우수한 청동을 만들 수 없어서 철기로 넘어가게 되었다는 주장, 마지막으로 청동과 철을 같이 만들었지만 철광석이 구하기 쉬워서 철 생산량이 늘어나게 되고, 그 결과 철기가 문명의 주도적인 도구로 자리 잡게 되었다는 주장이다.

필자는 이 중에서 세 번째가 가장 타당하다고 생각한다. 철 제조가 시작된 이후에도 청동의

생산이나 청동기 제작은 계속되었다. 그리고 이 시기에는 아직 철 생산 기술이 충분하게 발전하지 못해서 철과 청동의 강도를 분석해보면 철이 생산되기 시작하고도 한참 동안 청동의 강도가 철 보다 더 컸다. 그렇지만 청동은 자원이 충분하지 못했기 때문에 철을 계속 만들어서 도구로 활용했고, 시간이 지나갈수록 풍부한 자원을 가진 철의 생산이 늘어나고 철 생산 기술이 좋아지면서 철의 우수한 성질이 구현되어 가면서 철의 성질이 청동을 능가하게 되었고, 결국 도구나 무기가 모두 철로 만들어지는 시대로 넘어가게 된 것이다. 거의 모든 지역에서 이러한 천이 과정이 나타나는데 이러한 천이에 대체로 500년 정도 걸렸다.

이 글에서 인류가 구리와 철을 어떻게 만들게 되었는지 살펴보았다. 인류가 석기를 넘어서 금속을 사용할 수 있게 만들어 준 것이 환원이 쉬운 구리 덕분이었으며, 철을 만들어서 문명을 획기적으로 발전시켜 갈 수 있었던 철 만들기가 황동광이라는 철과 구리를 같이 함유하는 광석 때문에 가능할 수 있었다. 이러한 과정에 대한 이해가 가능해진 이유가 재료에 대한 정밀한 분석 기술이 발달했고, 이 기술이 유물에 대한 연구에 활용되면서 역사학계에서 오랜 기간 풀지 못하는 미스터리였던 의문들에 대한 설명을 제시해 주고 있다. 인류 문명의 중요한 계기인 금속 만들기의 비밀이 최신의 정밀 분석 기술의 도움으로 풀려가고 있고, 앞으로도 이러한 분석 기술이 역사 연구 분야에 활용된다면 더 많은 역사의 비밀들을 이해할 수 있게 될 것이다.