

주기율표로 본 과학기술의 오딧세이 현대는 탄소의 시대이다

인류문명의 발달사를 보통 석기, 청동기, 철기시대로 구분하는데 그렇다면 앞으로 다가올 21세기 이후는 어떤 시대가 될 것인가. 주기율표를 따져보면 불을 일으킨 부싯돌이나 돌도끼의 주성분이 실리콘(규석)이기 때문에 석기시대를 실리콘시대로 볼 수 있으며 청동기를 거쳐 철기시대인 현대엔 다시 실리콘시대로 돌아와 탄소에서 일단 대단원의 막을 내리게 될 것으로 본다. 탄소는 21세기에도 과학기술의 핵심 원소로 중요한 역할을 담당할 것이다.



金熙濬
<서울대 자연과학대학 화학과 교수>

문명의 발달사는 보통 석기, 청동기, 철기시대로 구분된다. 이러한 문명의 구분은 인류가 활용 기술을 발전시킨 대상 원소에 의한 구분이라고 볼 수 있다. 그렇다면 현대는 무슨 시대인가? 또 다가오는 21세기는? 이러한 의문을 가지고 원소의 입장에서 문명의 역사를 따라서 과학기술의 발전을 살펴보는 것도 흥미있는 일이라 생각된다. 원소의 입장에서 본다면 이러한 여정은 ‘주기율표 상의 오딧세이’가 될 것이다.

석기시대는 실리콘시대

인류를 의미하는 호모 사피엔스 (*Homo sapiens*)라는 말에서 사피엔스는 ‘현명하다’는 뜻이라고 한다. 그렇다면 초기 인류는 어떤 면에서 다른 동물들과 구별되는 지혜를 지녔다는 말인가? 생각해보면 맨 손의 인간은 웬만한 맹수와 대결하면 잡아먹힐 수 밖에 없는 불리한 조건을 지니고 있다. 인간은 표범이나 사자같이 빨리 달리지도 못하고, 날카로운 이빨을 지니지도 못했다. 그러나 초기 인류가 다른 동물에 비해 우위를 점하는 데는 불을 다룰 줄 알았다는 점과 도구를 만들 줄 알았다는 점이 결정적으로 중요한 의미를 갖는다. 사람은 불을 이용해서 자신을 보호하고 도구를 이용해서 다른 동물을 정복해 나가게 된 것이다.

그런데 흥미롭게도 이 두가지 사건에 모두 주기율표의 4족에 속하는 실

리콘(규소)이 중요한 역할을 한다. 실리콘은 불을 일으키는데 사용된 부싯돌이나 돌도끼, 활촉에 사용된 돌 모두의 주성분이기 때문이다. 사실 지각의 주성분은 이산화규소(SiO_2)라고 해도 과언이 아니다. 그런데 같은 4족 원소 탄소의 산화물인 이산화탄소(CO_2)는 우리의 숨에 들어있는 기체인데 비해서 이산화규소는 우리가 맑고 다닐 수 있는 고체이다. (이것은 크게 다행한 일이다. 이산화탄소가 이산화규소처럼 고체라면 어떨까?) 이런 이유로 실리콘은 우리 삶의 터전인 대지의 주성분 원소로 자리잡았고, 인류의 조상은 돌을 이용해서 불을 일으키고 도구를 만들었다. 석기시대는 실리콘의 시대이다.

청동기는 전이원소시대

석기시대 다음에는 구리의 시대인 청동기시대와 철의 시대인 철기시대가 등장하는데, 구리와 철은 모두 주기율표에서 전이원소라 불리는 특수 집단에 속한다. 따라서 청동기와 철기를 합해서 전이원소시대라고 불러도 좋을 듯하다. 석기시대에서 전이원소시대로의 발전은 주기율표 상에서 왼쪽으로의 이행을 의미한다.

어쨌든 인류가 구리의 녹는 점인 섭씨 1083도를 쉽게 얻게 되면서 문명이 청동기시대로 접어들었는데, 구리는 원자번호 20인 칼슘과 31인 갈륨 사이에 자리잡은 4주기의 전이원소 10가지(스칸듐, 티타늄, 바나듐, 크롬, 망간, 철, 코발트, 니켈, 구리, 아연) 중에서 거의 오른쪽 끝에 있는 원소이다. 제일 오른쪽 끝에 있는 아연은 녹는 점이 420도로 너무



낮고 반응성이 높아서 도구의 재료로는 실용적이지 못하다. 구리도 혼자로는 그다지 매력적이 아니지만 합금을 만들면 석기와는 비교도 할 수 없는 막강한 힘을 발휘하게 된다.

흥미있게도 구리와 어울려 청동이라는 합금을 만드는 주석과 납은 실리콘과 마찬가지로 4족 원소이다. 청동기시대는 실리콘시대에 미련을 벼리지 못하고 있는 전이원소시대인 것이다.

철기시대는 인류가 철의 녹는 점인 1540에 도달하고 나서야 시작된다. 철은 다른 모든 금속 원소보다 지각에 월등 많이 들어있기 때문에 인간이 철을 제련하기 시작하고부터 지금 까지 철은 가장 많이 사용되는 금속으로의 위치를 빼앗기지 않고 있다. 철이 없다면 건축물의 기본 골격을 만드는데 무슨 대안이 있을지 궁금하다. 그런 의미에서 현대는 아직 철기시대이다. 아무튼 청동기시대에서 철기시대로 옮아간 것은 주기율표 상에서 실리콘에서 구리로의 이동이 왼쪽으로 한단계 더 진행된 것을 의미한다. 그런데 구리에 4족의 주석과 납이 보태지면 청동이 되듯이, 철에도 4족의 탄소가 보태지면 강도가 높은 강철이 얻어진다.

전이원소의 왼쪽 이동은 거기에서 그치지 않는다. 녹이 슬지 않는 스테인레스강에는 12퍼센트 이상의 크롬이 들어가고, 항공기나 기타 특수 목적에 사용되는 금속 소재에는 티타늄, 바나듐, 망간 등의 금속이 필수적이다. 이들은 모두 전이금속 중에서 철보다 왼쪽에 자리잡은 원소들이다. 오늘날 하이테크 사회는 우리가

생각하는 이상으로 구리와 철 이외의 전이금속들에 의존하고 있다.

그런데 무기와 도구의 소재가 구리에서 철로 바뀌고 나서 국가와 개인의 부와 권력이 축적됨에 따라, 아이러니칼하

게도 구리와 같은 족에 속하는 은과 금의 위치는 더욱 튼튼하게 된다.

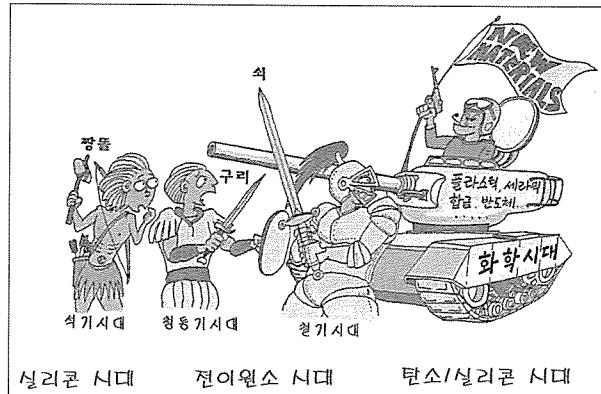
그리고 천년 이상의 오랜 세월에 걸쳐 금을 만들어 보려는 노력이 줄기차게 이어진다. (연금술의 꿈은 인간이 원자핵의 변환을 이해하고 나서 실현되었다. 실제로 원자로 내부에 수온을 놓았더니 일부가 질량수 200인 금으로 바뀌어졌다. 불행히도 이동위원소는 반감기가 48분에 불과해서 반지를 만드는데는 적합하지 않겠지만)

4족 원소의 르네상스시대

그렇다면 20세기, 아니 다가오는 21세기를 주도하는 원소는 무엇일까? 흥미롭게도 3천년이나 권좌를 누리던 철기 문명이 20세기에 이루어진 화학의 발전과 실리콘 반도체에 의한 기술 혁명에 의해 4족에게 자리 를 내어준다.

생명의 핵심 원소로서의 탄소

2천년대 초에는 우리가 발견하거나 만들어낸 화합물이 2천만가지를 넘게 될 전망인데 그 중 70% 이상은



▲ 출처 : “화학을 알면 길이 보인다” (대한화학회, 그림 박동곤)

탄소를 포함한 유기화합물이 될 것이다. 그렇게 보면 현대는 탄소의 시대이다.

물론 탄소 화합물에 대한 관심은 새로운 것은 아니다. 진시황이 찾았다는 불로초의 가상적인 생리활성 물질은 천연 유기화합물이었을 테고, 17세기 유럽에서 의학 교육에 화학이 도입된 이후로는 유기화합물의 의약학적 응용이 본격화되었다. 그러나 본격적인 탄소의 화학은 1806년에 베르첼리우스가 유기화학이라는 말을 사용하면서 시작되었다.

특히 빌려에 의해 생명체에 의해서만 만들어진다고 믿어졌던 요소가 합성되면서 모든 생명현상을 화학반응의 결과로 해석하는 관점의 기초가 확립되고, 리비히, 케쿨레 등에 의해 유기화학이 확실히 자리를 잡으면서 4족에서 시작되어 전이원소로 넘어갔던 주기율표 상의 여정은 다시 4족으로 방향을 전환한다.

19세기 후반에는 파스퇴르와 뷔크너에 의하여 생명활동의 기본이 되는 효소작용이 밝혀지고, 미쉐르에 의해 핵산이 발견되는 등 생체 화합물에

대한 연구가 본격화되면서 생화학의 기본으로서 탄소 화학의 위치가 재확인된다. 빌려에 의해 유기화합물은 반드시 생체에서만 만들어지는 것은 아니라는 사실이 밝혀진 것과 흥미로운 대조를 이룬다.

1860년 이후에 처음으로 자연에 존재하지 않는 화합물을 합성하기 시작한 유기화학은 이제는 복잡한 유기화합물의 3차원적 구조나 반응성의 이해를 넘어서서, 복잡한 구조의 생체화합물과 적절한 상호작용을 할 수 있는 화합물의 구조를 설계하고 이를 합성하는 일을 목표로 하는 경지에 도달했다.

석기, 청동기, 철기시대에 비하면 탄소의 화학의 역사는 아주 짧다고 볼 수 있으나, 탄소 화합물의 무한한 가능성과 개개인의 전강이 고령화 사회에서 인간의 궁극적 관심으로 남아 있을 것을 생각할 때 생명의 원소로서의 탄소의 위치는 오랜 기간 확고하게 유지될 것이 틀림없다.

탄소시대 새로운 幕 올라

반도체 소재로서의 실리콘

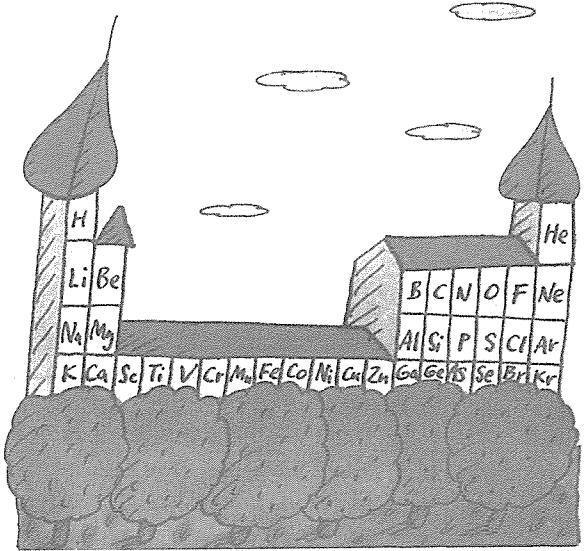
20세기에 이루어진 가장 획기적인 발명 중에 반도체 집적회로를 이용한 컴퓨터와 이에 수반되는 인터넷을 빼 뜨릴 수 없다. 더구나 다가오는 21세기는 정보화가 더욱 가속화되는 정보사회가 될 것이라고 한다. 그리고 보면 4족 원소의 르네상스에는 탄소 못지 않게 실리콘이 크게 기여를 한 셈이다.

그런데 흥미로운 것은 실리콘이 반도체의 소재로서 특이한 위치를 지닌 이유와 탄소가 유기화합물의 골격을

이루는 이유가 모두 이 두 원소의 주기율표에서의 특수한 위치와 관련되어 있다는 점이다. 전이원소를 제외한 1족부터 0족 까지의 여덟족 중에서 화학적 활성이 없는 불활성 기체를 제외하면 탄소와 실리콘이 속한 4족은 바로 중간에 위치하고 있다.

따라서 탄소는 4의 원자가를 가지며, 네개의 공유 결합을 만들면서 고분자를 포함하여 다양한 유기화합물을 만들어낸다. 한편 주기율표의 중심족에 속한 탄소는 전기음성도가 산소나 할로겐 원소와 같이 아주 높지도 않고, 그렇다고 알칼리족이나 알카리토족 원소와 같이 아주 낮지도 않다. 따라서 탄소는 여러 가지 원소와 다양한 반응을 일으키며, 이렇게 만들어진 탄소의 화합물은 다양한 물리적, 화학적 성질을 나타낸다.

한편 역시 4족에 속하는 실리콘은 도체인 금속 원소들과 부도체인 비금속 원소들 사이에 위치한다. 따라서 실리콘보다 전자를 하나 더 가지거나 덜 가진 원소를 소량 넣어줌으로써 쉽게 n-type이나 p-type 반도체를 만들 수 있다. 지각에 풍부한 실리콘이 이런 특이한 성질을 가졌다는 것은 참으로 다행한 일이다. 값비싼 재료를 써야 반도체를 만들 수 있다고 한다면 컴퓨터는 부유층의 독점물이



▲ 출처: “심심풀이로 읽는 화학”(에버하르트 로사 지음, 이세은 옮김, 김영사)

되었을지도 모른다.

요즘 세상에는 모든 가전제품은 물론 각종 교통수단, 통신수단에 반도체가 안들어가는 곳이 없다. 금속에 자리를 빼앗겼던 실리콘은 극적으로 재기를 해낸 것이다.

탄소 나노 튜브

4족의 르네상스는 여기에서 그치지 않는다. 실리콘 소재에 의한 반도체의 미세화가 마이크론 단위에서 한계에 부딪치고 있는데, 돌파구가 다름 아닌 탄소 나노 튜브에서 나올 것이라는 가능성이 제기되고 있기 때문이다. 이 부분은 다음호에서 자세히 다루기로 하는데, 아무튼 실리콘에서 시작되어 실리콘으로 되돌아 온 주기율표 상의 오딧세이는 탄소에서 일단 대단원의 막을 내리지 않나 생각된다. 그리고 4족의 우두머리인 탄소는 생명과학과 재료과학의 발전을 주도하며, 21세기에도 과학과 기술의 핵심 원소로 중요한 역할을 담당할 것인가 틀림없다. ⑪