

제 1 교시

국어 영역

성명

수험 번호

과학·기술 01 뿌리혹 세균의 질소 고정 (168p)

식물은 공기 중 이산화 탄소에서 얻는 탄소와 산소를 제외하면 나머지 대부분의 영양 원소를 토양에서 얻는다. 토양은 식물 뿌리와 미생물이 무기 영양소를 얻기 위해 치열하게 경쟁하는 복잡한 생태계이지만, 식물과 미생물이 상호 이익을 위해 공생하기도 한다. 식물은 탄수화물과 같은 유기 양분을 미생물에게 공급하고, 미생물은 식물이 토양의 양분을 좀 더 효과적으로 활용할 수 있게 도와주는 것이다.

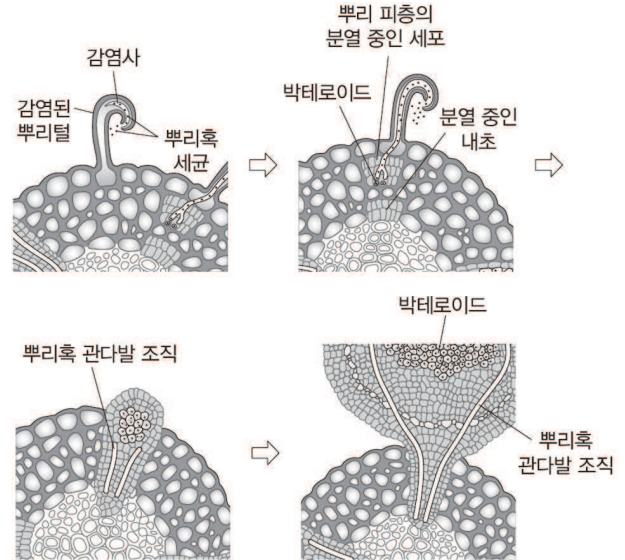
식물의 필수 원소 중에서 식물이 상대적으로 많은 양을 필요로 하는 9종류를 다량 영양소라고 하는데, 이중 하나인 질소는 식물의 단백질, 핵산, 엽록소 등의 구성 성분으로 쓰이기 때문에 식물의 생장에 큰 영향을 미친다. 대기의 78%가 질소로 구성되어 있지만 질소 분자는 두 개의 질소 원자가 매우 안정된 삼중 결합으로 결합되어 있기 때문에 대부분의 생물체는 질소 기체를 직접 이용할 수 없다. 식물이 이용할 수 있는 형태의 질소를 얻으려면, 공기 중에 존재하는 질소 분자를 반응성이 높은 다른 질소 화합물인 암모니아(NH_3)나 질산염(NO_3^-)으로 변환하는 과정인 질소 고정이 필요하다.

자연 상태에서의 질소 고정은 주로 생물학적 질소 고정에 의해 이뤄지는데, 이는 질소 고정 세균이 가진 질소 고정 효소의 촉매 작용에 의해 질소가 환원되어 암모니아가 생성되는 것이다. 질소 고정 효소는 철 단백질과 몰리브덴-철 단백질이라는 두 개의 성분으로 구분할 수 있으며, 둘 중 하나만으로는 촉매 활성이 나타나지 않는다. 철 단백질은 ATP*를 분해하여 얻은 에너지를 이용해서 몰리브덴-철 단백질에 전자를 공급하고, 몰리브덴-철 단백질은 공급받은 전자로 질소 기체를 환원시켜 암모니아를 생성한다.

철 단백질과 몰리브덴-철 단백질은 모두 산소 분자에 의해 빠르게 비활성화되는데, 철 단백질이 산소에 의해 활성이 반으로 줄어드는데 걸리는 시간인 반감기는 30~45초이고 몰리브덴-철 단백질의 경우에는 10분이다. 이러한 비활성화는 되돌릴 수 없기 때문에 질소 고정은 산소가 없는 환경에서 이루어져야 한다. 그런데 질소 고정에는 많은 양의 에너지가 필요하고 이 에너지는 산소 분자가 존재할 때 효율적으로 작동하는 세포 호흡 과정을 통해 생산된다. 생물체는 ①질소 고정에서 산소와 관련된 딜레마를 해결하기 위해 다양한 전략을 개발했는데, 질소 고정 세균의 하나인 뿌리혹 세균과 콩과(科) 식물의 공생이 대표적이다.

질소 고정 세균의 대부분은 토양에서 독립생활을 하고 일부만이 식물과 공생 관계를 형성하는데, ②뿌리혹 세균은 한정된 종류의 숙주 식물로 하여금 뿌리혹을 형성하게 하여 공생한다. 뿌리혹 세균은 토양 속에서 단독으로 생존할 때는 질소 고정을 하지 않고 콩과 식물의 뿌리혹 안의 세포 내에서 박테로이드라는 형태로 존재할 때만 질소 고정을 수행한다. 뿌리혹 세균은 ATP를 생산하는 데 필요한 대사 연료인 탄수화물을 콩과 식물로부터 공급받고, 질소

고정을 수행하여 생산한 암모니아를 콩과 식물에게 공급한다.



콩과 식물은 뿌리혹 세균과 화학적 신호를 주고받으며 뿌리혹을 형성한다. 콩과 식물의 뿌리가 뿌리혹 세균을 끌어들이기 위한 화학 신호를 내보내면 토양 속의 뿌리혹 세균이 이에 반응하여 뿌리털에 결합한다. 뿌리혹 세균이 뿌리 피층의 세포 분열을 촉진시키는 물질을 분출하면, 뿌리털의 끝이 굽어지고 세포벽의 일부가 분해되어 세포막이 합입*되면서 가느다란 관 형태의 구조인 감염사가 형성된다. 감염사는 뿌리의 피층을 관통해 안쪽으로 신장하며 이를 통해 세균이 식물 뿌리로 들어가게 된다. 감염사에 있던 세균은 피층 세포의 세포질 속으로 들어가서 질소 고정을 수행하는 박테로이드로 발달하고, 세균에 감염된 피층과 내초*의 생장이 계속되어 하나로 합쳐져 뿌리혹을 형성한다. 뿌리혹은 식물로부터 양분을 공급받고 질소 화합물을 식물 전체에 보내기 위해 뿌리 중심의 관다발 기둥으로 관다발 조직을 발달시킨다. 성숙한 뿌리혹은 뿌리 직경보다 몇 배 두껍게 성장하는데, 목질화된 바깥층은 기체의 출입을 제한하여 질소 고정에 필요한 환경을 조성한다.

콩과 식물의 뿌리혹에서 산소 공급은 주로 레그헤모글로빈이라 부르는 산소 결합 단백질에 의해 조절된다. 레그헤모글로빈은 숙주 식물에 의해 합성되어 박테로이드로 감염된 숙주 세포 안에 존재하며, 호흡 중인 세균의 세포로 산소 수송을 도와주는 기능을 한다. 이로 인해 박테로이드의 산소 농도는 질소 고정에 필요한 ATP와 환원력을 제공하기 위한 호흡을 하기에 충분하면서도 과량의 산소로 인해 질소 고정 효소가 비활성화되지 않는 수준을 유지한다.

*ATP: 아데노신에 인산기가 3개 달린 유기 화합물로, 분해될 때 발생하는 에너지가 생물체의 생명 활동에 사용됨.

*합입: 표면에 있는 세포층의 일부가 안쪽으로 빠져 들어가서 그 곳에서 새로운 층을 만들. 또는 그런 현상.

*내초: 관다발 기둥의 가장 바깥층.

과학·기술 02 보어와 슈뢰딩거의 원자 모형 (172p)

수소 기체에 전기 방전을 일으키면, 에너지를 흡수한 수소 분자의 분자 내 결합이 깨지면서 수소 분자가 수소 원자들로 분해된다. 이렇게 생성된 수소 원자 내 전자는 들뜬상태*가 되어 기저 상태보다 높은 에너지를 갖게 되고, 이후 낮은 에너지 상태로 전이하는 과정에서 특정 파장의 빛을 ㉠ 방출한다. 이러한 수소 원자의 방출 스펙트럼은 프리즘을 통과한 햇빛이 보여 주는 연속적인 스펙트럼과 달리 분리된 몇 개의 선만을 포함하는데, 이를 선 스펙트럼이라 한다. 선 스펙트럼의 존재는 수소 원자 내 전자의 에너지 준위*가 불연속적이며, 특정한 값의 에너지 상태만이 ㉢ 허용된다는 것을 의미한다.

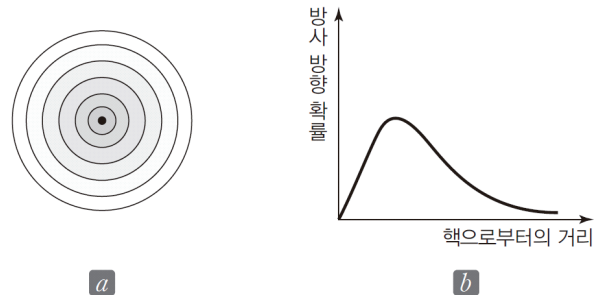
이러한 현상을 설명하기 위해 닐스 보어는 고전 물리학을 바탕으로 원자 모형을 제안했다. 고전 물리학에 따르면, 움직이는 입자는 직선 운동을 하려는 관성이 있으므로 원운동을 하려면 원의 중심으로 향하는 힘을 계속 가해야 한다. 보어는 전자가 원자로부터 떨어져 나가지 않고 돌고 있는 것은 양(+)전하를 띤 원자핵과 음(-)전하를 띤 전자 사이의 인력 때문이며, 전자는 원자핵 주변의 특정한 에너지 준위에서 원형 궤도를 따라 움직인다고 생각했다. 그리고 이를 바탕으로 도출된 수소 원자의 에너지 준위가 방출 스펙트럼과 일치한다는 것을 설명할 수 있었다. 그러나 전자가 하나뿐인 수소와 달리 다전자 원자에는 ㉣ 보어의 모형이 적용되지 않았을 뿐 아니라, ㉤ 전하를 띤 입자의 가속도 운동에 관한 고전 물리학 이론에 위배됐기 때문에 보어의 모형은 한계가 있었다. 즉 전자는 원형 궤도를 따라 원자핵 주위를 움직일 수 없었다.

슈뢰딩거는 전자의 파동성을 바탕으로 새로운 원자 모형을 제안했다. 그는 핵에 결합된 전자를 정상파로 보고, 원자를 파동 역학적으로 ㉥ 설명하려 했다. 기타나 바이올린에서 양쪽 끝이 고정된 현이 특정 음을 내는 것처럼 파동이 특정 영역 안에 고정된 경우 파동이 정상 상태에 있다고 하고, 그러한 파동을 정상파라고 한다. <그림 1>의 각 점은 진폭이 0인 마디이며, 양 끝의 마디가 고정되어 파동이 1/2파장의 정수 배로만 나타난다. 즉 정상파는 허용되는 파장이 특정 파장의 정수 배로 제한된다. 따라서 전자를 정상파로 가정하면 파장이 불연속적인 값을 갖는다는 것을 설명할 수 있다. 슈뢰딩거는 이러한 가정을 바탕으로 원자에 대한 ㉦ 양자 역학적 모형을 제안했다.

3차원 공간에서 전자의 위치를 나타내는 좌표(x, y, z)의 함수로 수소 원자의 파동 함수를 ㉧ 고려해 보자. 하이젠베르크의 불확정성 원리에 따르면, 어떤 입자의 위치와

운동량을 동시에 정확히 측정하는 것은 불가능하므로, 파동 함수를 통해 전자의 정확한 움직임은 알 수 없다. 하지만 파동 함수의 제곱값은 특정한 물리적 의미를 가진다. 그 값은 공간의 특정 점 부근에서 전자를 발견할 확률과 관련된다. 예를 들어 점 $1(x_1, y_1, z_1)$ 과 점 $2(x_2, y_2, z_2)$ 에서 전자를 발견할 상대적 확률은, 두 점의 좌표에 따른 파동 함수값을 제공한 후 이들 사이의 비율을 계산하여 얻을 수 있다. 점 2의 함수값의 제곱에 대한 점 1의 함수값의 제곱의 비율이 100이라면 점 1에서 전자를 발견할 확률이 점 2의 100배라는 것을 의미한다.

따라서 파동 함수를 제공하여 <그림 2>의 ㉡와 같이 전자 확률 분포를 그릴 수 있다. 이 그림에서 어떤 점의 농도는 그 점에서 전자를 발견할 확률을 ㉢ 표시한 것이다. 이때 전자를 발견할 확률은 핵에서 멀어질수록 감소한다. 따라서 수소 핵 주위의 공간이 <그림 2>의 ㉡와 같이 점점의 껍질로 싸여 있다고 가정하면, 각 껍질 속에서 전자를 발견할 확률은 <그림 2>의 ㉢와 같이 특정 거리까지 증가하다가 감소할 것이다. 왜냐하면 핵으로부터의 거리가 멀어질수록 전자를 발견할 확률은 감소하지만 각 껍질의 부피는 증가하므로, 각 껍질 속에서 전자를 발견할 확률, 즉 방사 방향 확률은 증가하다가 감소하기 때문이다. 이때 수소 원자에서 ㉣ 방사 방향 확률의 최댓값이 나타나는 핵으로부터의 거리는 보어 모형의 궤도 반지름과 일치한다.



<그림 2>

*들뜬상태: 원자의 전자가 에너지를 얻어 기준 에너지보다 더 높은 에너지 준위에 위치한 상태.

*에너지 준위: 원자 내 전자가 가질 수 있는 에너지의 값. 전자가 원자핵에 가까울수록, 즉 낮은 에너지 준위에 있을수록 전자는 낮은 에너지를 가지며 더 안정한 상태임.

과학·기술 03 윌슨의 구름 상자 (177p)

1894년 9월, 윌슨은 스코틀랜드 최고봉인 벤네비스산에 올랐다가, 안개와 구름 속에서 관찰자의 그림자가 드리워지며 그림자 주위에 아름다운 무지개무늬가 나타나는 브로켄 현상을 목격했다. 그는 이 현상을 실험실에서 재현하기로 결심했다. 윌슨은 먼저 실험실에서 밀폐된 용기 속에 축축한 공기를 팽창시켜 구름을 만드는 시도를 했는데, 이 장치를 ㉠구름 상자라고 불렀다. 그러나 그가 의도했던 광학 현상을 재현하지 못한 상태에서 그는 더 흥미로운 현상을 발견하였다. 그는 물이 반쯤 담긴 병에서 공기를 펌프로 뽑아냈는데, 이 과정에서 공기 중에 응결핵*이 있을 경우 특정 팽창비*에서 물방울이 생성되는 것을 보았다. 공기 중에서 이 응결핵을 머금은 물방울을 제거하고 공기를 팽창시켜 같은 팽창비에 도달하면 남아 있던 응결핵에 의해 다시 구름이 만들어졌다. 윌슨은 같은 과정을 반복했을 때 공기 중에 떠 있던 응결핵이 줄어들어 같은 팽창비에서는 수증기가 있어도 더 이상 응결이 일어나지 않는 공기, 즉 과포화 공기가 만들어진 것을 발견했다.

윌슨은 구름이 생기는 데 미치는 응결핵의 효과를 확인하기 위해 당시 새롭게 발견된 다양한 선*들을 과포화 공기가 담긴 구름 상자에 쏘이고 응결핵이 생성되는지를 관찰하였다. 그는 이 실험에서 선들이 통과하는 경로를 따라 생기는 물방울을 통해 선들이 응결핵을 만들어 낸다는 것을 확인할 수 있었다. 이 구름 상자에 전기장을 걸었을 때 응결핵을 머금은 물방울들이 전기력에 의해 움직이는 것을 관찰했고, 이를 통해 생성된 응결핵이 이온임을 확인할 수 있었다. 실제로 음극선*의 경로에 생긴 물방울들이 양극 쪽으로 이동하는 것을 통해 음극선을 구성하는 전자가 공기 분자와 충돌해 생성된 음이온이 응결핵임을 알 수 있었다. 생성된 물방울을 전기장을 이용해 제거한 후 공기를 팽창시키면 구름이 형성되지 않았다. 이로부터 선들이 공기 중에서 ㉡진행하면서 이온을 만들어 내고 그 이온은 주변의 수증기 분자를 전기력으로 당겨 물방울을 만들어 내는 것으로 볼 수 있었다.

윌슨은 1911년에 개선된 구름 상자로 실험을 수행하다가 엑스선을 쏘인 과포화 공기에서 가는 실 모양의 구름이 엑스선의 경로에 나타난 것을 발견하였다. 구름 상자에 전기장을 걸어 주자 실 모양의 구름이 양극으로 이동하는 것으로 보아 구름을 구성하는 물방울은 음전하를 띠고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 윌슨은 엑스선이 공기를 구성하는 분자와 충돌하면서 전자가 산란되고, 그 전자가 주변의 수증기를 정전기 인력으로 끌어당겨 음전하를 띤 물방울을 형성한 것으로 제대로 해석했다. 다음에 윌슨이 알파 입자*의 발생원을 구름 상자에 넣자 그 발생원에서 방사형으로 퍼져 나오는 알파 입자의 경로에 직선 모양으로 응결된 구름 알갱이들이 나타났다. 알파 입자는 주변을 양전하로 대전시키며 진행하다 멈추는데 이때 생성된 양이온이 수증기를 끌어당겨 물방울이 생성된 것이다. 윌슨이 구름 상자의 옆에 적당한 베타선*의 발생원을 가져오자 길쭉한 실 모양의 궤적이 나타났다. 조사해 보니 이 궤적은 음전하를 띤 입자에

의해 만들어진 것이 드러났는데 이는 베타선의 실체가 음전하를 띤 전자라는 사실과 일치했다. 윌슨은 구름 상자에서 선마다 다른 모양으로 나타나는 궤적들을 선명하지는 않지만 사진으로 남길 수 있었다. 이후 장치 개선이 이루어졌고 이듬해 윌슨은 더 선명하게 선들의 특징적인 궤적을 식별할 수 있는 사진들을 발표할 수 있었다.

구름 상자 속에서 빠르게 지나가는 입자가 주변을 이온화하면서 남기는 독특한 궤적을 통해 입자의 정체를 파악할 수 있다는 것이 알려지자 구름 상자는 입자 물리학의 표준적인 장비로서 널리 활용되기 시작했다. 구름 상자는 눈에 보이지 않는 전하를 띤 입자가 빠르게 움직이는 궤적을 가시화할 수 있게 해 준 최초의 장치였고, 이론적으로만 치부되었던 여러 입자의 실체를 시각적으로 드러내 준 획기적 장치였다. 구름 상자는 새로이 많은 입자의 검출과 관찰에 광범위하게 활용되어 입자 물리학의 발전에 큰 기여를 했고 이후에 등장하는 더 성능이 좋은 입자 검출 장치들의 모태가 되었다.

* 응결핵: 대기 중에서 수증기의 응결 중심이 되는 흡습성의 미립자.

* 팽창비: 기체 따위의 팽창 후의 부피를 팽창 전의 부피로 나눈 값.

* 선: 빛, 입자, 에너지 등의 폭이 좁은 흐름.

* 음극선: 진공 방전을 할 때에, 음극에서 양극으로 빠르게 흐르는 음이온의 흐름.

* 알파 입자: 방사성 물질의 원자핵이 알파 붕괴할 때 나오는 헬륨 원자핵. 양성자 2개와 중성자 2개로 구성됨.

* 베타선: 방사성 물질의 원자핵의 베타 붕괴할 때 나오는 고속의 전자선.

과학·기술 04 외계 행성 탐지에 사용되는 시선 속도법 (181p)

51 페그(Peg) b는 최초로 발견된 외계 행성, 즉 태양이 아닌 다른 별 주위를 도는 행성이다. 외계 행성의 발견은 천체 물리학의 새 분야를 열었고, 행성에 대한 새로운 이해를 낳았다. 51 페그 b의 발견에 사용된 시선 속도법은 행성의 존재와 운동을 모(母)행성*의 운동을 감지하여 추정한다.

시선 속도법을 적용하기 가장 단순한 경우는 등속 원운동하는 단 하나의 행성만이 항성 주위를 관찰자를 포함하는 면에서 공전하는 경우이다. 이는 아빠가 아이의 두 손을 잡고 아이를 빙글빙글 아빠 주위로 원을 그리며 돌리는 상황과 비슷하다. 이때 두 사람 각각의 질량 중심*은 두 사람 전체의 질량 중심 주위에서 반지름이 일정한 원을 그리며 같은 주기로 돈다. 이때 아빠와 아이 각각의 질량 중심은 두 사람 전체의 질량 중심을 기준으로 서로 반대쪽에 위치하고, 아이의 질량 중심이 아빠의 질량 중심보다 두 사람 전체의 질량 중심으로부터 더 멀리 위치한다. 따라서 아이의 질량 중심은 큰 원을 그리며 두 사람 전체의 질량 중심 주위를 돌고, 아빠의 질량 중심은 조그만 원을 그리며 두 사람 전체의 질량 중심 주위를 돈다. 항성과 행성도 각각 항성-행성 계의 질량 중심 주위를 같은 주기로 원운동을 하는데, 보통 항성이 행성보다 훨씬 무겁기 때문에 항성-행성 계의 질량 중심은 행성의 질량 중심보다 항성의 질량 중심에 훨씬 더 가까워 항성 내부에 있다. 그러므로 행성의 질량 중심은 항성-행성 계의 질량 중심을 중심으로 큰 원을 그리는 반면, 항성의 질량 중심은 항성-행성 계의 질량 중심을 중심으로 아주 작은 원을 그린다. 항성과 행성은 회전하는 동안 늘 항성-행성 계의 질량 중심에서 서로 반대편에 위치한다. 그러므로 행성이 관찰자에게 다가오면 항성은 관찰자에게서 멀어지고 행성이 관찰자에게서 멀어지면 항성은 관찰자에게 다가온다.

시선 속도는 대상이 관찰자 쪽으로 다가오거나 멀어지는 속도인데, 대상이 관찰자에게 가까워질 때 음숫값, 멀어질 때 양숫값을 갖는다. 멀리 떨어져서 이 항성-행성 계를 관찰하는 관찰자에게 행성은 작고 빛을 내지 않기 때문에 관찰하기 어렵지만 항성은 크고 빛을 내기 때문에 관찰이 더 쉽다. 행성이 항성 주위를 도는 동안 행성이 관찰자에게서 멀어지면 항성의 시선 속도는 음수, 행성이 관찰자에게 다가오면 항성의 시선 속도는 양수가 된다. 모 항성이 행성과 짝을 이루어 항성-행성 계의 중심 주위를 도는 속도는 항성에서 나오는 빛의 스펙트럼에 변화를 일으킨다. 도플러 효과에 의해 항성의 시선 속도가 양수로 절댓값이 커질수록 빛의 파장이 길어지고, 항성의 시선 속도가 음수로 절댓값이 커질수록 빛의 파장이 짧아지기 때문에 행성의 공전 주기에 맞추어 스펙트럼의 파장도 같은 주기로 변한다.

통상적으로 항성의 시선 속도는 초속 10m 정도에 불과하므로 웬만한 분광기로는 감지가 어렵다. 도플러 분광학을 이용해 항성의 시선 속도를 기존의 분광기보다 정밀하게 측정할 수 있도록 설계된 ⑦ 엘로디(ELODIE) 분광기는 1994년에 광학 망원경에 장착되어 작동을 시작했다. 엘로디 분광기는 전체 가시광선 영역인 390nm와 681nm

사이에서 최고의 해상도를 가진 스펙트럼을 얻었다. 1994년 봄에 마요르와 켈로 팀은 엘로디 분광기를 가지고 태양계로부터 25pc(파섹)* 이내 영역의 외계에서 행성을 찾아나섰다. 켈로는 지도 교수인 마요르가 안식년을 보내는 동안인 1995년 1월에 지구에서 48광년 떨어진 페가수스자리에 있는 5등급 별인 51 페그를 관측했는데 별빛의 스펙트럼에서 청색편이와 적색편이가 나타남을 확인했다. 처음에는 계기 이상을 의심했으나 이내 변이의 규칙성을 근거로 목성의 절반 정도의 질량을 갖는 행성이 0.05 천문단위*의 거리에서 4.2일의 주기로 51 페그 주위를 공전하고 있다고 판단했다. 그

[A] 행성의 대기는 1,000 에 달하게 뜨거웠다. 켈로는 지도 교수에게 외계 행성을 발견했다고 보고했지만 이런 특성을 갖는 행성은 생각할 수 없었으므로 지도 교수는 믿지 않았다. 그러나 7월까지 켈로가 추가적으로 모은 측정 결과들이 이전 결론을 지지하자 마요르는 생각을 바꾸었다. 그들의 논문은 목성과 유사한 질량이며서 목성과 달리 뜨거운 대기를 갖고 항성 가까이에서 공전하는 거대 행성을 발견했다는 보고를 담고 있어서 그동안 천문학자들이 받아들이던 고전적인 행성 생성론에 들어맞지 않아 논란이 일어났다. 그렇지만 곧이어 이 방법으로 외계 행성들이 여럿 발견되었고 그중에는 뜨거운 거대 행성들도 있었기에 기존의 패러다임은 수정되었다.

이런 와중에 2009년, 프랑스 주도의 코롯(COROT) 계획이 외계 행성 코롯(COROT) 7b를 통과법으로 발견하고, 2012년부터는 갑자기 통과법으로 외계 행성이 발견되는 일이 부쩍 늘어났다. 이 방법은 시선 속도법과 달리 행성의 질량이 아니라 크기를 알아낸다. 통과법은 행성이 항성의 앞면을 통과할 때 항성의 빛이 관찰자에 도달하는 양이 줄어들어 항성의 밝기가 어두워지는 정도를 감지하여 행성의 존재와 반지름, 주기 등을 알아낼 수 있다. 이후 이 두 가지 방법 외에 미세 중력 렌즈 방법 등이 추가되었고, 더 많은 외계 행성이 발견되면서 외계 행성 천문학에 큰 진보가 일어났다. 또한 태양계의 구조와 행성 궤도 배열이 전형적인 것이 아니며, 다른 항성계는 훨씬 다양한 구조와 행성 궤도 배열을 가질 수 있다는 것이 알려지게 되었고, 지구와 유사한 조건을 ③ 갖춘 행성은 찾기가 어렵다는 것도 알려지게 되었다.

* 항성: 천구 위에서 서로의 상대 위치를 바꾸지 아니하고 별자리를 구성하는 별.

* 질량 중심: 어떤 물체 또는 물체의 모임의 모든 질량이 모여 있고 외력이 모두 그 점에 작용하는 것처럼 움직이는 특별한 점.

* 파섹: 거리의 단위. 1파섹은 3.26광년.

* 천문단위: 태양과 지구 사이의 평균 거리. 1천문단위는 약 1.5억 km.

과학·기술 05 낮은 열팽창 계수를 가지는 합금 (186p)

열팽창이란 온도의 변화에 따라 물체의 길이, 부피 등이 변화하는 현상을 말한다. 열팽창 현상은 다양한 분야에서 중요하게 고려된다. 예를 들어 건축물이나 교량을 설계할 때 온도 변화에 따른 재료의 팽창과 수축을 고려하지 않으면 구조물에 균열이 생기거나 파손될 수 있다. 철도 레일을 설치할 때 레일과 레일 사이에 약간의 간격을 ㉠ 두는 것도 여름에 온도가 상승할 때 레일이 팽창하여 서로 부딪히지 않도록 하고, 겨울에 온도가 낮아서 레일이 수축할 때 공간이 너무 많이 벌어지지 않도록 하기 위한 것이다.

어떤 온도 T_0 에서 길이 L_0 인 물체의 온도를 T_f 까지 올렸을 때 물체의 열팽창 이후의 길이를 L_f 라 하자. 이때 물체의 길이 변화($L_f - L_0$) 값을 처음 길이 L_0 로 나눈 길이 변화율의 값은 온도 변화($T_f - T_0$)가 클수록 커진다. 따라서 길이 변화율은 온도 변화와 계수(α)의 곱으로 나타낼 수 있으며 이때의 계수를 선형 열팽창 계수라고 한다. 선형 열팽창 계수는 어떤 재료가 가열됨으로써 팽창되는 정도를 나타내는 재료의 성질이며, 단위는 온도 단위의 역수인 $(^\circ\text{C})^{-1}$ 로 표현된다. 선형 열팽창 계수를 얻는 것과 같은 방법으로 부피에 기반하여 체적 열팽창 계수를 정의할 수 있는데, 열팽창이 재료의 모든 방향으로 같은 정도로 일어나는 물질의 경우 체적 열팽창 계수는 선형 열팽창 계수의 3배 정도의 값이다. 대부분 플라스틱과 금속 재료의 선형 열팽창 계수는 각각 10^{-5} 과 10^{-4} 정도 값과 10^{-3} 과 10^{-2} 정도 값을 갖는다. 이러한 수치는 매우 작은 것처럼 보이지만 상당한 열팽창이 일어나는 것이다. 가령 어떤 물질의 선형 열팽창 계수가 $10^{-3}(^\circ\text{C})^{-1}$ 이라면 이 물질의 온도가 25에서 125로 올라갈 때 길이 변화율은 0.1이므로 10%의 길이만큼 열팽창이 일어나고 선형 열팽창 계수가 이라면, 1%의 길이만큼 열팽창이 일어난다. 이러한 작은 수치도 정밀 기계 분야에서는 문제가 되므로 작은 열팽창 계수를 갖는 물질은 정밀 기계 분야에서 활용성이 크다. 회전 바퀴나 진동 운동을 하는 진자의 경우 열팽창이 일어나면 부품의 성능이 저하되기 때문이다. 가령 태양에 의해 작동하는 기계식 시계의 경우 평형 바퀴가 축을 중심으로 운동을 하는데 열팽창은 평형 바퀴의 직경을 미세하게 증가시키고 이러한 증가는 바퀴의 운동을 천천히 진행시켜 시계의 시간을 느리게 한다.

따라서 과학자들은 낮은 선형 열팽창 계수를 갖는 물질의 개발에 대한 관심이 많았는데 이러한 연구의 시조는 프랑스의 물리학자 샤를 에두아르 기욤이었다. 그는 1896년에 후일 노벨상을 받게 되는 중요한 발견을 하였다. 상온에서 230까지 거의 0에 가까운 열팽창 계수를 가진 철-니켈의 합금을 발견한 것이다. 이 합금은 무게로 조성을 나타냈을 때 64% 철과 36% 니켈의 합금이었으며 인바(Invar)라는 이름을 갖게 되었다. 인바란 ‘변하지 않는’이라는 의미의 어원을 가지고 있다. 인바의 선형 열팽창 계수는 상온에서 $1.6 \times 10^{-6}(^\circ\text{C})^{-1}$ 이다. 일반적인 물질에서 온도가 올라감에 따라 일어나는 팽창은 인바의 경우 인바가 갖는 강자성체 성질 때문에 일어나는 자기 변형이라는

수축 현상에 의해 상쇄된다. 자기 변형이란 온도가 올라가면서 강자성체의 자기적 성질이 감소하는데 이때 강자성체 물체의 부피 또한 자성 감소에 영향을 받아 수축되는 것을 의미한다. 외부에서 자기장이 가해지는 동안에만 자성을 갖는 반자성체와 달리 강자성체는 외부 자기장이 가해지지 않는 상황에서도 매우 큰 자성을 띠는 물질이다. 강자성체는 퀴리 온도*보다 높은 온도에서는 자성을 잃어버리게 되는데, 인바의 퀴리 온도인 230보다 높은 온도에서 인바는 일반적인 열팽창을 따르면서 온도에 따라 열팽창이 크게 일어난다. 고체 재료의 열팽창은 제조 공정의 공정 변수와 제조 후의 열처리에도 영향을 크게 받는데 인바 또한 예외는 아니다. 인바는 800 근처의 높은 온도에서 열처리를 하고 상온으로 급랭한 후 가공하는 경우에 가장 낮은 선형 열팽창 계수의 값이 얻어지며, 이렇게 얻은 인바라도 높은 온도로 열처리를 하면 선형 열팽창 계수가 증가한다.

최근 선형 열팽창 계수가 0에 가까운 다른 합금들도 개발되고 있다. 그중 하나가 슈퍼인바이다. 슈퍼인바는 인바의 니켈 일부를 다른 강자성체 금속인 코발트로 대체하여 5%의 코발트가 들어 있는 조성이다. 슈퍼인바의 선형 열팽창 계수는 $0.72 \times 10^{-6}(^\circ\text{C})^{-1}$ 이다. 그러나 슈퍼인바는 낮은 열팽창이 일어나는 온도 구간이 인바에 비해 상대적으로 좁다.

* 퀴리 온도: 자성체들의 자성이 급격히 변화하는 온도.

과학·기술 06 파이토크롬 (189p)

빛은 식물이 광합성을 하는 데 쓰일 뿐 아니라 생장과 관련된 여러 주요 과정들을 유도하기도 한다. 이러한 주요 과정에 주로 관여하는 빛은 청색광과 적색광으로, 이들은 각각 청색광 광수용체와 적색광 광수용체를 통해 식물에 흡수된다. 광수용체는 생물이 흡수한 빛 에너지를 다른 에너지로 변환시켜 일정한 기능을 갖게 하는 세포 기관 또는 화합물을 통틀어 ㉠말하는데, 식물의 경우 청색광 광수용체와 적색광 광수용체가 각각 청색광과 적색광을 흡수한다. 청색광 광수용체인 크립토크롬과 달리 적색광 광수용체인 파이토크롬은 식물의 씨앗 발아 과정과 음지 회피 과정을 유도한다.

식물 종자에는 빛의 유무가 발아에 영향을 거의 미치지 않는 종자도 ㉡있지만, 빛이 있어야 발아가 쉬운 광발아 종자와 빛이 없어야 발아가 쉬운 암발아 종자도 있다. 상추, 쪽갓과 같은 광발아 종자는 파종* 시에 흙을 얇게 덮어 빛이 침투할 수 있게 해야 발아가 촉진된다. 이와 반대로 토마토나 수박과 같은 암발아 종자는 파종 시 빛이 닿지 못하도록 충분히 깊게 심거나 흙을 두껍게 덮어야 한다. 1980년대 과학자들은 상추씨의 발아 과정을 연구하였다. 그들은 다양한 파장의 단색광이 조사된 상추씨를 암실에 보관하고 발아율을 측정하였다. 그 결과 660nm 파장의 적색광을 조사한 경우에 발아율이 가장 높았으며 가시광선 영역 바로 밖의 730nm 파장인 근적외선을 조사한 경우는 빛을 전혀 조사하지 않은 상추씨보다도 발아율이 ㉢낮았다. 또한 적색광과 근적외선을 교대로 한 번씩만 조사한 경우는 마지막에 조사한 빛에 의해서 발아율이 결정되었으며 각각의 광선을 한 번만 조사한 경우와 발아율의 차이가 없었다. 즉 적색광과 근적외선의 ㉣발아율에 대한 효과는 광기억적이라는 것을 알아냈다.

적색광과 근적외선의 서로 다른 영향을 매개하는 광수용체가 바로 파이토크롬이다. 대부분의 파이토크롬에서 광 흡수 부분은 광기억적으로, 조사되는 빛의 파장에 따라 두 가지 형태로 상호 전환된다. 즉 적색광 흡수 형태(P_r)의 파이토크롬은 적색광을 잘 흡수하여 근적외선 흡수 형태(P_{fr})의 파이토크롬으로 전환되며 P_{fr} 은 근적외선을 흡수하여 P_r 로 전환된다. P_r 과 P_{fr} 의 상호 전환은 빛에 의해 유도되는 식물의 발아를 조절하는 스위치로 작용한다. 적색광을 받은 상추씨의 P_r 이 P_{fr} 로 전환되어 발아에 필요한 여러 세포 내 반응들을 자극하며 적색광을 받은 씨앗이 다시 근적외선을 받으면 P_{fr} 은 P_r 로 전환되어 발아가 억제되는 것이다. 자연 상태에서 빛에 의해 유도되는 씨앗의 발아는 파이토크롬 기작*으로 어떻게 설명할 수 있을까? 식물은 P_r 로 파이토크롬을 합성하고 씨가 암 상태에 놓여 있으면 파이토크롬은 P_r 로 존재한다. 그러나 씨에 햇빛이 조사되면 파이토크롬은 적색광과 근적외선을 포함한 모든 파장의 빛을 받게 되고 많은 P_r 이 P_{fr} 로 전환된다. P_{fr} 이 나타나는 것이 바로 식물이 햇빛을 인지하는 하나의 방법이다. 즉 씨가 처음으로 적절한 햇빛에 노출되면 이 생겨 발아가 유도된다.

파이토크롬 시스템은 또한 식물에게 빛의 질에 관한 정보를 제공한다. 햇빛은 적색광과 근적외선을 모두 포함하고 있기에 낮 시간 동안 P_r 과 P_{fr} 의 상호 전환은 평형에 ㉤이르게 되며, 이때 두 형태의 파이토크롬량의 비율은 적색광과 근적외선의 상대적 비율을 뜻한다.

이러한 정보로부터 식물은 빛의 질 변화에 대하여 반응한다. 상대적으로 강한 빛이 필요한 나무에서 나타나는 음지 회피 반응이 그 예이다. 강한 빛이 필요한 나무가 키가 큰 다른 나무들에 가려 빛을 제대로 받지 못하게 되면, 키가 큰 나무들이 근적외선보다 적색광을 더 많이 흡수하기 때문에 이 나무에 도달하는 근적외선의 비율이 높아져, P_{fr} 이 전환된 P_r 이 상대적으로 많아진다. 이것은 나뭇잎의 엽록소가 적색광은 흡수하지만 근적외선은 흡수하지 않고 통과시키기 때문이다. 적색광과 근적외선 비율 변화는 강한 빛이 필요한 나무가 자신이 ㉥가지고 있는 양분을 위쪽으로 자라는 데에 이용하도록 하는 신호로 작용한다. 반면 다른 나무에 의해 빛이 가려지지 않은 채로 직접 햇빛을 받으면 위쪽으로 자라는 생장은 억제되고 곁가지가 많이 생긴다.

* 파종: 곡식이나 채소 따위를 키우기 위하여 논밭에 씨를 뿌림.

* 기작: 생물의 생리적인 작용을 일으키는 기본 원리.

과학·기술 07 에이전트 (193p)

에이전트란 컴퓨터 분야에서 사람 대신 단순하고 반복적인 업무를 처리하는 자동화 시스템을 말한다. 에이전트는 기본적으로 인간의 오감에 해당하는 감지기를 통해서 외부 환경을 지각하고, 전기적 에너지를 가하여 원하는 동작을 작동시키는 작동기들을 통해서 환경에 대해 어떠한 동작을 수행한다. 최근에는 에이전트가 그동안 사람만이 담당해 오던 지능적인 사고가 필요한 업무도 대행하고 있다. 이는 에이전트에 인공지능이 결합함으로써 가능해졌는데 이를 지능형 에이전트라고 한다. 지능형 에이전트는 최상의 결과를 내도록 행동하는 합리적 에이전트 접근 방식을 취한다. 합리적 에이전트는 환경이 실제로 어떻게 변하는 것이 바람직한지에 대한 성공의 기준을 제시하는 성과 측도에 근거해, 감지기를 통해 지각한 모든 정보에 해당하는 지각결과 에이전트의 내장 지식에 의존하여 성과 기준에 부합할 만한 동작을 선택한다. 에이전트가 선택한 동작은 에이전트의 외부 환경 상태를 변화시킨다.

동작을 선택하는 기본적인 에이전트 프로그램에는 단순 반사 에이전트, 모형 기반 에이전트, ㉠ 목표 기반 에이전트, 효용 기반 에이전트 등이 있다. 단순 반사 에이전트는 지각결과에서 항상 현재 지각에만 근거해서 동작을 선택할 뿐 나머지 지각은 무시한다. 그래서 관측을 불가능하게 하는 요인이 조금만 있어도 적절한 동작을 하지 못하게 된다. 모형 기반 에이전트는 모형을 활용하여 시간의 흐름에 따라 환경의 상태를 갱신하여 지각한다. 이를 위해서는 두 종류의 지식을 에이전트 프로그램에 넣어야 한다. 첫째는 전이 모형으로 환경의 작동 방식에 관한 지식이다. 이 지식은 다시 두 부분으로 나뉘는데 에이전트가 수행한 동작의 효과 부분과 에이전트의 동작과 무관하게 날씨 변화와 같이 독립적으로 환경이 변화하는 부분이 그것이다. 둘째는 감지기 모형으로 비나 눈이 오는 것과 같은 환경의 상태가 에이전트의 지각들로 어떻게 반영되는가와 같은 방법에 관한 지식이다. 그런데 에이전트에는 이러한 현재 상태에 관한 지식뿐만 아니라 앞으로의 바람직한 상황들에 해당하는 목표에 대한 정보도 필요하다. 가령 무인으로 움직이는 택시의 에이전트라면 택시가 가는 목적지가 에이전트가 도달하는 목표라고 할 수 있을 것이다. 목표 기반 에이전트는 모형 기반 에이전트에 쓰인 것과 동일한 지식과 목표에 대한 정보를 결합해서 목표를 달성하는 동작을 선택할 수 있다. 이러한 의사 결정을 지원하는 지식이 명시적으로 표현될 뿐만 아니라 그러한 지식을 수정할 수 있다는 점에서 목표 기반 에이전트는 유연한 면이 있다. 그런데 목표 기반 에이전트에서 목표의 달성 여부는 단지 만족 상태인지 불만족 상태인지만 제공할 뿐이다. 효용 기반 에이전트는 성과 측도를 내장하여 그 상태가 얼마나 바람직한지를 성과 측도에 따른 성과 측정치로 구체화할 수 있어서 서로 다른 동작의 결과들을 비교하여 더 유용한 동작을 선택한다. 무인으로 움직이는 택시가 목적지에 도달하는 여러 방법 중 더 우월한 방법을 선택할 수 있게 하는 것이다.

현재 인공 지능 분야에서 이러한 에이전트 프로그램을 구현하는 방법으로 선호되는 것은 학습하는 기계를 구축한 후 그 기계를 가르치는 방식이다. 동작을 선택하는 기본적인 에이전트 프로그램도 학습하는 에이전트로 구축할 수 있다. 에이전트는 학습을 통해 미리 알지 못한 환경에서도 작동할 수 있으며 초기 지식으로 가능한 수준 이상으로 유능해질 수 있다. 일단 에이전트가 자신이 접한 환경을 충분히 경험하고 나면, 에이전트는 지식을 갱신하며 행동을 선택할 수 있게 되는 것이다. 따라서 학습 능력을 주입하면 한 종류의 합리적 에이전트가 아주 다양한 환경들에서 성공적인 동작을 선택할 수 있다.

학습하는 에이전트는 크게 학습 요소, 비평가, 수행 요소, 문제 생성기라는 네 가지 개념적 구성 요소로 나뉜다. 학습의 진척을 책임지는 학습 요소는 에이전트가 얼마나 잘하고 있는지에 관해 비평자가 제공한 피드백에 기초해서 이후에 더 잘하려면 외부 동작의 선택을 책임지는 수행 요소를 어떻게 수정해야 하는지 결정한다. 감지기에 의한 지각들 자체는 에이전트가 얼마나 성공적인지 말해 주지 않으므로 비평자가 꼭 필요하다. 학습 요소는 수행 요소의 그 어떤 지식이라도 변경할 수 있고, 비평자는 고정된 어떠한 성과 기준에 근거해서 에이전트가 얼마나 잘하고 있는지를 학습 요소에 알려 준다. 수행 요소는 앞서 언급한, 동작을 선택하는 에이전트 전체에 해당하는 것으로, 지각이 입력되면 동작을 결정하여 실제 동력을 일으키는 기계인 발동기에 전달한다. 문제 생성기는 학습 요소의 학습 목표를 달성할 수 있게 새롭고 배울 점이 있는 경험으로 이어질 동작들을 수행 요소에 제시한다. 만일 수행 요소가 독자적으로 움직인다면 수행 요소는 현재 아는 한도 안에서 계속해서 최상의 동작들을 유지할 것이다. 그러나 만일 에이전트가 단기적으로는 다소 덜 최적일 수 있는 동작들을 수행하는 탐험을 한다면, 장기적으로는 더 나은 동작을 발견할 가능성이 있다. 문제 생성기의 임무는 장기적으로 더 나은 동작을 발견할 수 있도록 탐험적 동작들을 제시하는 것이다.

학습하는 에이전트 프로그램의 학습 방법은 다양하다. 그러나 각 학습 방법들을 통한 학습은 하나의 목표가 있는 과정으로 볼 수 있다. 학습을 통해 에이전트의 각 구성 요소를 수정하여 에이전트의 전반적인 성과를 향상하는 과정인 것이다.

과학·기술 08 에크모 (198p)

심폐 기능에 문제가 생기면 인체 내부의 여러 조직 및 기관으로 산소가 전달되지 않기 때문에 생명이 위험해질 수 있다. 심정지 상태일 때 심폐 소생술을 실시하거나 자가 호흡을 하지 못할 때 인공호흡기 등을 활용하는 것도 이러한 이유 때문이다. 하지만 심장이나 폐에 치명적인 문제가 생기면 응급조치나 단순한 치료만으로는 심폐 기능을 회복시킬 수 없다. 문제가 되는 부분을 치료하고 회복하는 동안 환자의 심폐 기능을 대신하는 인공 장치를 에크모라고 한다.

에크모는 심장과 폐를 대신하여 혈액에 산소를 공급하고 이산화 탄소를 제거하여 치료와 회복에 필요한 충분한 시간을 확보할 수 있게 해 준다. 심장은 순환계의 핵심 기관으로 수축과 이완을 반복하며 압력을 생성하고 이를 통해 인체의 모든 혈관 내부에 혈액이 흐를 수 있도록 한다. 혈액의 중요한 역할 중 하나는 산소를 운반하여 체내의 각 조직에 공급하는 것이다. 산소는 에너지 생성, 면역, pH 균형 유지 등 인체의 생명 유지에 필수적이므로 원활한 혈액의 순환이 이루어져야 한다. 혈액은 온몸을 돌면서 산소를 공급하는 동시에 체내에서 생산된 이산화 탄소를 운반하는 역할도 한다. 이산화 탄소를 운반해 온 혈액은 대정맥을 따라 심장으로 들어간다. 그리고 우심실을 거친 후 폐동맥을 통해 폐로 들어가게 되고 폐포에서 가스 교환이 ㉠ 일어난다. 가스 교환이란 혈액에 있던 이산화 탄소가 제거되고 호흡을 통해 공기 중에서 체내로 들어온 산소가 혈액으로 공급되는 것이다. 새롭게 산소를 공급받은 혈액은 폐정맥을 통해 다시 심장으로 돌아온다. 이러한 과정을 폐순환이라고 하며, 폐순환을 거친 혈액은 대동맥을 따라 온몸을 순환하며 신체의 각 조직에 산소를 공급한 후 다시 체내에 있던 이산화 탄소를 가지고 대정맥으로 돌아오는 체순환을 하게 된다. 하지만 심폐 기능에 문제가 생기는 경우 폐순환 및 체순환이 제대로 이루어지지 않는다. 이때 에크모를 사용하여 신체의 정상적인 작용을 대신하는 것이다.

에크모는 환자의 혈액을 몸 밖으로 빼낸 후 체외에서 가스 교환을 하고 다시 환자의 몸으로 주입하는 방식으로 작동한다. 에크모는 혈액 도관, 펌프, 산화기로 구성되어 있다. 혈액 도관은 몸에 삽입하는 튜브 형태의 관으로 혈액을 빼내거나 다시 넣는 통로 역할을 한다. 혈액은 유체이므로 도관의 직경이 크고 길이가 짧을수록 혈액이 더 잘 흐를 수 있다. 펌프는 혈액 도관으로 혈액이 잘 흐르게 하는 역할을 한다. 펌프에 들어온 혈액은 설정된 속도대로 회전하는데, 펌프는 회전을 통해 발생하는 힘으로 혈액을 몸 밖으로 당기거나 몸 안으로 밀어 넣게 된다. 따라서 펌프 내의 회전 속도에 따라 혈압이나 1분당 분출되는 혈액량 등이 결정된다. 만약 펌프가 제대로 작동하지 않으면 혈액이 도관을 통해 거꾸로 흐를 수 있기 때문에 주의할 필요가 있다. 산화기는 혈액에 산소를 주입하고 이산화 탄소를 제거하는 기능을 하는 장치로 에크모에서 가장 핵심적인 역할을 한다. 산화기 내부에는 성질이 다른 물질을 분리하거나 전달하는 역할을 하는 멤브레인이라는 막이 있다. 에크모에 사용되는

멤브레인은 분압차를 이용하여 산소와 이산화 탄소를 이동시킨다. 산화기에 주입하는 산소는 분압이 높은 상태로 멤브레인을 통해 반대편에 있는 분압이 낮은 혈액으로 이동하게 되는 것이다. 동시에 혈액 내에 있던 이산화 탄소는 멤브레인을 통해 반대편으로 이동하여 밖으로 배출된다.

에크모는 혈액을 빼고 다시 넣는 위치에 따라서 ㉡ VA 방식과 ㉢ VV 방식으로 나뉘어진다. VA 방식은 대정맥에서 혈액을 빼내어 대동맥으로 다시 넣어 주는 방식으로 환자의 심장과 폐를 대신한다. VA 방식은 심장을 통한 혈액의 정상적인 흐름이 유지될 수 있도록 보조하는 형태로 이루어진다. 대정맥에서 뽑은 혈액을 산화기를 거치게 한 후 대동맥으로 넣어 주는 것이다. 즉 VA 방식은 체순환을 끝낸 혈액이 심장과 폐를 거치지 않고 다시 체순환을 하게 된다. 몸 밖으로 빼낸 혈액을 대동맥으로 넣어 줄 때는 펌프를 활용하는데 펌프는 심장의 기능을 대신하여 혈액의 흐름이 일어날 수 있도록 하고 체순환이 원활히 이루어지게 하는 역할을 한다. VV 방식은 대정맥에서 혈액을 빼내어 산화기를 거치게 한 후 다시 대정맥 내로 넣어 주는 방식이다. 따라서 이 방식을 활용하기 위해서는 환자의 심장이 반드시 제 기능을 하고 있어야 한다. 심장이 정상적으로 기능하고 있기 때문에 산화기를 거친 혈액을 다시 대정맥으로 넣어 주면 폐순환을 하게 되고 폐포에서의 가스 교환에 문제가 생기더라도 산소를 품은 혈액을 온몸으로 공급하는 것이 가능하다.

에크모는 인체 내부의 작용인 혈액 순환 및 가스 교환을 외부에서 시행하는 것이기 때문에 여러 위험성을 내포한다. 전신의 혈액이 신체 외부의 기계를 거쳐 가기 때문에 혈액은 지속적으로 외부에 노출된다. 노출된 혈액은 응고의 가능성이 높아 혈전이 생성되어 혈액의 흐름이 막힐 수도 있다. 따라서 혈전의 생성을 막기 위해 항응고제를 사용하는데, 이로 인해 출혈이 발생하기 쉽고 지혈이 되지 않는 등 다른 문제가 발생할 수도 있다. 또한 외부에 노출된 혈액은 감염의 위험성도 높다. 하지만 에크모는 위급한 상황에서 생명을 유지할 수 있는 유용한 수단이기 때문에 부작용을 줄이기 위한 지속적인 연구가 진행되고 있다.

과학·기술 09 보의 처짐과 철근 콘크리트 보 (202p)

우리는 일상생활의 공간을 필요에 따라 벽이나 기둥으로
 ㉠ 나누어 방이나 화장실 같은 여러 공간으로 만든다. 이때
 벽이나 기둥은 천장이나 지붕의 하중을 떠받치는 역할도 한다.
 그런데 비교적 좁은 구역으로 구분되는 생활 공간과 달리 실내
 주차장이나 교각과 교각 사이는 너무 조밀한 구역으로
 나뉘어서는 안 되며 자동차나 선박이 통행할 수 있도록 벽이나
 교각 사이의 거리가 충분히 확보되어야 한다.

벽이나 기둥과 같은 구조물 사이를 가로질러 놓이는 형태의
 구조물을 ‘보’라고 하는데, 보는 벽이나 기둥의 구조적 안정성을
 높이고 더 큰 하중을 지탱할 수 있도록 한다. 그러나 벽이나
 기둥 사이의 거리가 멀어져 보의 길이가 길어지게 되면 보에는
 처짐 현상이 발생한다. 처짐 현상이 발생하면 구조물이 무너지지
 않고 하중을 지탱할 수 있다고 할지라도 사용상에 문제가 있을
 수 있다. 따라서 구조물의 안전을 확보하기 위해 설계의
 단계에서부터 보의 처짐량을 계산하는 것이 중요하다.
 <그림>과 같이 두 기둥 사이를 가로지르는 보가 있다고 가정해
 보자. <그림>

에서 ㉡ 보의
 처짐량은 두
 기둥 사이의
 중간 지점에서
 최대인 최대
 처짐량이 된다.

최대 처짐량은 기둥 간 거리의 네제곱에 비례한다. 따라서 기둥
 간의 거리가 2배 늘어날 때 같은 재료의 보를 사용한다면 보의
 최대 처짐량은 16배나 커지게 된다.

따라서 길이를 길게 하면서도 보의 처짐량을 줄이기 위해서는
 변형이 잘 일어나지 않는 재료를 사용해야 한다. 어떤 재료를
 만들어진 보에서 변형이 일어나는 정도는 변형률로 나타낼 수

있는데, ㉢ 보의 변형률과 원래 치수와의 비인 $\frac{\text{변형량}}{\text{원래 치수}}$ 을
 ㉣ 변형률이라 한다. 보가 외부로부터의 힘인 외력을 받으면
 보의 내부에는 외력에 저항하는 힘이 생기는데, 이 저항력을
 내력이라고 한다. 작용 반작용의 법칙에 따라 내력은 외력과
 크기가 같고, 반대 방향으로 작용하며, 외력을 제거하면
 없어진다. 외력에 의해 발생하는 내력은 외력이 증가함에 따라
 증가하지만, 재료마다 고유한 한계가 있다. 따라서 외력이 ㉤
 내력의 한계치를 넘게 되면 외력을 지탱할 수 없어 보가
 파괴된다. 만일 같은 크기의 하중이 단면적이 다른 보들에
 작용한다면 각각의 보에 발생하는 내력은 같을 것이다. 이때
 하중이 더욱 커진다면 단면적이 큰 보는 파괴되지 않아도
 단면적이 작은 보는 파괴될 수 있다. 이는 단위 면적당 지탱해야
 하는 힘이 커지기 때문이다. 따라서 ㉥ 보의 강도를 판단하기
 위해서는 단위 면적당의 내력을 고려해야 하는데, 단위 면적당의
 내력을 응력이라고 한다.

콘크리트는 다른 재료들에 비해 단위 면적당 지탱할 수 있는

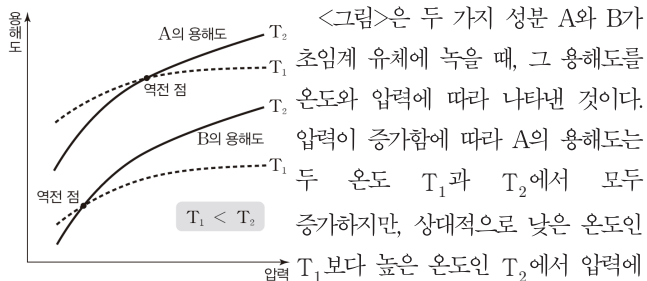
힘이 크며, 시멘트에 모래와 자갈 등을 섞어 물로 반죽하기
 때문에 다양한 형상의 구조물로 만들기 용이하다는 장점이 있어
 보의 재료로 많이 활용된다. 특히 콘크리트 구조물은 물체를
 양쪽에서 밀어붙이는 것과 같이 압축하는 외력에 저항하는 힘이
 크다. 따라서 압축하는 외력에 의해 발생하는 압축 응력이
 크다고 할 수 있다. 그러나 물체를 양쪽으로 잡아당기는 것과
 같이 인장하는 외력에 저항하는 힘인 인장 응력은 압축 응력에
 비해 $\frac{1}{9} \sim \frac{1}{13}$ 정도이며, ㉦ 콘크리트의 내력을 높일수록 그
 차이는 더욱 커진다.

따라서 ㉧ 콘크리트로 보를 만들 때에는 철근을 함께
 사용한다. 보에서 압축 응력이 발생하는 부분에는 콘크리트를
 집중적으로 사용하고, 인장 응력이 발생하는 부분에는 철근을
 집중적으로 사용하여 더 큰 힘을 견디는 철근 콘크리트 보를
 만드는 것이다. 철근은 인장 응력이 크며, 콘크리트와 열팽창
 계수가 비슷하여 온도의 변화에 따라 콘크리트와 비슷한 정도로
 늘어나거나 줄어들 수 있기 때문이다.

과학·기술 10 초임계 유체와 분리 공정 (206p)

19세기 초의 화학자 토마스 앤드루스는 기체의 액화 현상을 주로 연구하였다. 그는 이산화 탄소에 압력을 가하는 압축 실험을 통해 이산화 탄소의 온도를 31 이하에서 유지하고 압력을 높이면 이산화 탄소가 액화된다는 사실을 발견하였고 31에서 이산화 탄소를 액화하기 위해서는 73.8bar*의 압력이 필요하다는 것을 알아냈다. 그리고 31보다 온도가 높게 유지되면 이산화 탄소에 아무리 높은 압력을 가해도 액화가 되지 않는다는 사실을 발견하여 31과 73.8bar를 각각 이산화 탄소의 임계 온도와 임계 압력이라고 ㉠붙였다. 그 이후 좀 더 정밀한 측정 실험으로 이산화 탄소의 임계 온도는 31.06로 변경되었다. 이러한 임계 온도와 임계 압력을 함께 일컬어 임계점이라 한다. 임계점 이상의 온도와 압력에서 물질은 액체와 기체의 중간 상태인 초임계 유체 상태로 존재하며 임계점은 물질에 따라 고유한 값을 가진다. 가령 산소의 임계점은 118.6와 50.5bar이다.

유체의 성질 중 용질의 용해도에 가장 큰 영향을 ㉡미치는 것이 용매의 밀도이다. 밀도는 유체가 가지는 단위 부피당 질량을 ㉢뜻하며 어떤 물질을 녹일 수 있는 능력은 유체의 밀도에 의해 크게 좌우된다. 초임계 상태에서는 초임계 유체를 구성하는 분자 사이의 거리를 조절함으로써, 액체와 달리 밀도를 크게 변화시킬 수 있어서 용해도를 큰 폭으로 조절할 수 있다. 가령 초임계 유체로 널리 사용하는 이산화 탄소의 경우 임계 온도 아래에서 압력을 55bar에서 200bar로 증가시키면 이산화 탄소의 밀도는 약 17% 증가되는 데 비해, 초임계 상태에서 이산화 탄소의 밀도는 약 570%까지 증가시킬 수 있다.



〈그림〉

결과적으로 두 곡선이 교차하는 지점이 생기는데 이 점을 역전 점이라 한다. 이 역전 점보다 낮은 압력에서는 온도가 증가하면 용해도가 감소하고 그보다 높은 압력에서는 반대의 현상이 일어난다. B의 경우 초임계 유체에서 압력과 온도에 따른 용해도 곡선의 형태는 A와 유사하지만, 역전 점은 A보다 더 낮은 압력에서 나타난다.

초임계 유체에 성분 A와 B가 같이 용해되어 있다고 해 보자. 이때 초임계 유체의 압력을 〈그림〉에 나타난 두 성분의 역전 점 사이에 유지한 다음, 유체의 온도를 T_2 에서 T_1 로 낮추면, B 성분에 대한 용해도는 감소하는 반면, A 성분에 대한 용해도는 증가할 것이다. 따라서 초임계 유체에 용해되어 있던 B 성분은 석출되고, A 성분은 용해된 상태로 ㉣남아 있게 된다. 그다음 유체의 온도를 다시 증가시키면 A에 대한 용해도는 감소하여 A가 석출된다. 이러한 원리를 이용하여 초임계 유체에 녹아 있는 두 성분으로 ㉤이루어진 혼합물을 분리할 수 있다. 이 방법은 실제로 벤조산과 테카네디올의 혼합물을 분리하기 위해 사용되기도 한다.

이와 같이 압력과 온도를 변화시켜 초임계 유체의 용해도를

조절하면 혼합물을 쉽게 분리할 수 있다. 일반적인 액체 용매는 초임계 유체와 같이 넓은 범위에서 용매의 밀도를 조절하는 데 제한적이다. 이러한 이유로 기존의 특정 물질을 분리하는 일반적인 액체 공정에서 액체 용매를 대체하는 효과적인 수단으로 초임계 유체가 주목받고 있다.

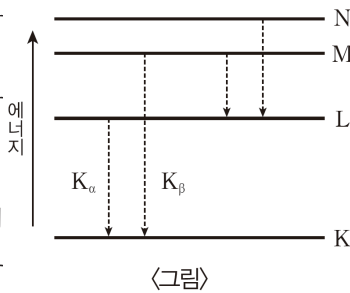
* bar: 압력의 단위로 1.103 bar가 1기압에 해당함.

과학·기술 11 X-선의 발생 방법과 재료 분석 응용 (209p)

원트겐에 의해 발견된 X-선은 $0.01 \sim 10\text{nm}$ 범위의 파장을 갖는 전자기파로, 가시광선의 파장이 수백 nm 정도인 것에 비해 매우 짧은 파장을 갖는다. 전자기파의 에너지는 파장이 짧을수록 더 큰 에너지를 가지기 때문에 물체에 깊숙이 침투할 수 있으며 물체를 투과할 수도 있다. X-선은 파장이 매우 짧아 재료의 표면뿐만 아니라 내부의 정보를 분석할 때 널리 쓰인다.

그렇다면 X-선은 어떻게 발생시킬 수 있을까? 진공 내에 설치된 양극과 음극 사이에 수십 kV의 고전압을 가하면 음극의 금속 필라멘트가 가열된다. 금속이 가열되면 금속 표면으로부터 전자가 튀어나오게 되는데, 이를 열전자 방출이라 한다. 이 현상으로 금속 필라멘트에서 튀어나온 전자는 양극과 음극 사이에 걸려 있는 전압에 의해 양극 쪽으로 가속된다. 그리고 그 전자가 큰 운동 에너지를 유지한 채 양극의 금속 표적을 때리면 X-선이 방출된다. 그러나 가속된 전자의 운동 에너지 대부분은 열에너지로 전환되어 금속 표적 온도가 올라가게 되므로 금속 표적이 녹지 않도록 금속 표적을 냉각해야 한다.

방출된 X-선에 대해 가로축에 파장, 세로축에 세기를 나타내는 그래프를 그리면 연속적으로 이어진 선을 얻을 수 있는데 이를 X-선 스펙트럼이라 한다. X-선 스펙트럼에는 바늘 모양으로 뾰족하게 튀어나와 있는 두 봉우리가 관찰되며 이 두 봉우리를 각각 K_α 와 K_β 로 부른다. 금속의 한 종류인 몰리브덴의 경우 0.05nm 에서 0.25nm 사이의 X-선이 방출되며, α 와 β 는 각각 0.07nm 와 0.06nm 이다. 이렇게 K_α 와 K_β 와 같은 특성 스펙트럼이 나타나는 이유는 금속의 원자에 속박된 전자들이 차지할 수 있는 안정된 에너지 준위*가 불연속적이기 때문이다. 금속의 원자에 속박된 전자는 <그림>과 같이 K, L, M, N의 불연속적인 특징한 에너지 준위를 갖는다. K의 에너지를 갖는 전자가 가속된 전자에 부딪혀 튕겨 나가면 L이나 M과 같이 더 높은 준위에 있던 전자 중 일부가 낮은 에너지 준위의 K로 떨어지면서 그 차이에 해당하는 특정 파장의 에너지를 방출한다. 이러한 특성 스펙트럼은 K, L, M, N과 같은 전자의 에너지 준위가 금속의 종류에 따라 다르므로, 표적 물질로 쓰인 금속의 종류에 따라 L에 있던 전자가 K로 떨어지면서 방출되는 K_α 와 M에 있던 전자가 K로 떨어지면서 방출되는 K_β 가 각각 고유한 값을 갖는다.



<그림>

전자기파 필터를 이용하면 발생된 X-선으로부터 특정 파장을 갖는 단파장의 X-선을 얻을 수 있는데 이러한 단파장을 이용하면 금속의 결정 구조를 파악할 수 있다. 금속은 결정 구조를 갖는데 결정은 원자가 층층이 규칙적으로 쌓여 있는 구조이다. 각 층은 X선을 반사하는 거울과 같은 역할을 한다. 따라서 금속의 표면에 특정 각도로 입사된 X-선은 표면에서 일부는 바로

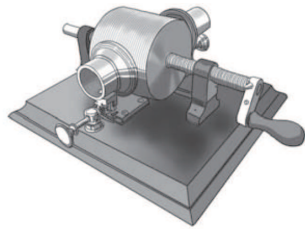
반사되고 일부는 표면 아래층에서 반사되어 나온다. 이때 표면에서 반사된 X-선과 표면 아래층에서 반사되어 나온 X-선은 상호 작용을 한다. 이러한 상호 작용으로 나타나는 것이 보강간섭과 상쇄간섭인데, 보강간섭은 파동이 같은 위상으로 중첩되어 진폭이 커지는 현상이며 상쇄간섭은 파동이 반대 위상으로 중첩되어 진폭이 작아지는 간섭을 말한다. X선은 전자기파이기 때문에 마루와 골을 갖는 사인 함수 모양이므로, 아래층에서 반사되어 나온 X-선의 마루와 골이 표면에서 반사된 X-선의 마루와 골과 위상차가 발생하지 않으면 반사된 X선은 보강간섭이 최대로 생기게 된다. 즉 표면을 투과하여 아래의 원자층에 의해 반사되어 나오는 X-선의 경로와 바로 표면에서 반사된 X-선의 경로 차가 마루와 마루의 거리인 파장의 정수 배일 때 보강간섭이 최대로 일어난다. 금속 원자는 종류에 따라 원자의 크기가 다르므로 층간의 거리 또한 다르다. 따라서 입사하는 X선의 파장이 고정되면 최대의 보강간섭이 일어나는 입사각은 금속의 종류에 따라 다르게 된다. 이러한 원리를 이용하면 ㉠ 미지의 금속이 어떤 금속인지 알 수 있다.

* 에너지 준위: 원자나 분자가 갖는 에너지의 값.

과학·기술 12 에디슨의 축음기의 구조와 작동 원리 (213p)

① 에디슨의 축음기는 1877년에 에디슨이 발명한 중계 전신기와 진밀하게 연관되어 있다. 전신을 받고 그것을 저장했다가 다시 전송하는 이 발명품의 핵심 부품은 전신 부호를 기록하기 위해 종이에 밀랍을 먹여 만든 회전 원반이었다. 이 원반이 회전하면 그 위에서 철판이 전기 신호에 따라 움직이며 밀랍 표면에 홈을 만들었고 그것을 뒤집어 돌리면 홈이 돌기로 바뀌고 철판이 돌기를 다시 전기 신호로 바꿔 주게 되어 있었다. 에디슨은 이 장치에서 힌트를 얻어 원통의 표면에 소리를 저장하고 거기에 저장된 소리를 재생하는 장치를 생각해 내었다.

완성된 에디슨의 축음기는 수화 장치, ㉠ 기록 장치, 재생 장치로 이루어져 있었다. <그림>은 이 축음기의 수화 장치와 기록 장치를 보여 준다. 수화 장치는 짧은 관으로, 한쪽 끝은 소리가 들어갈 수 있게 열려 있고 다른 쪽 끝은 매우 얇은 금속판으로 덮여 소리가 관으로 들어오면 금속판이 진동하게 되어 있다. 이 금속판의 중앙에는 작은 강철 핀이 바깥쪽으로 부착되어 있어서 금속판이 진동하면 함께 진동한다.



<그림>

기록 장치를 구성하는 원통은 못쇠로 만드는데 원통의 둥근 옆면의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지 한 가닥의 V 자 모양의 홈이 나선 모양으로 파여 있다. 이 원통의 중앙을 관통하는 회전축은 수평으로 놓인 상태에서 양쪽 끝부분이 베어링에 의해 지탱된다. 원통의 V 자 홈에는 수화 장치의 강철 핀의 끝이 근접해 있다. 회전축은 표면에 나선이 깎여져 있고 나선 베어링에 끼워져 있어서 회전축이 회전하면 축 방향으로 전진하게 되어 있다. 회전축의 한쪽 끝에는 핸들이 달려 있어서 그것을 돌리면 원통은 고정된 강철 핀 앞에서 회전하면서 축 방향으로 조금씩 움직인다. 부드럽고 탄성이 없는 금속인 주석으로 만든 얇은 박을 원통 위에 감아 주고 수화 장치의 강철 핀의 끝을 주석 박에 닿게 조정해 준 상태에서 수화 장치의 관에 말을 하면서 핸들을 일정한 속력으로 돌려 주면, 수화 장치의 강철 핀이 위아래로 진동하면서 원통의 V 자 홈을 따라서 주석 박의 표면에 깊이가 변하는 홈을 만든다. 이때 말소리에 따라서 각기 다른 형태의 홈이 주석 박에 새겨진다.

소리를 재현하는 재생 장치는 원뿔 형태의 금속 나팔이었는데 넓은 쪽은 열려 있고 좁은 쪽은 팽팽하게 펼쳐진 종이로 막혀 있다. 이 펼쳐진 종이 막의 중심에는 가벼운 용수철의 한쪽 끝이 수직으로 부착되어 있고 용수철의 반대쪽 끝에는 끝이 뾰족한 강철 핀이 달려 있다. 만약 강철 핀이 진동하면 그 진동이 용수철을 통해 종이 막으로 전달되어 종이 막이 진동하게 되어 있다. 소리를 재생하기 위해서는 원통을 되돌려서 녹음하기 전의 원래의 위치로 가져다 놓고 재생 장치의 강철 핀의 끝이 주석 박에 만들어진 홈의 첫 부분에 들어가게 한 후에 핸들을 돌리면 강철 핀이 새겨진 홈을 따라 움직이면서 진동을 용수철을 통해 종이 막으로 전달한다. 그러면 소리가 원뿔형 나팔로부터 나오는 것을

들을 수 있다. 이때 녹음할 때보다 핸들을 빨리 돌리면 소리가 고음으로 바뀌고 느리게 돌리면 소리가 저음으로 바뀐다.

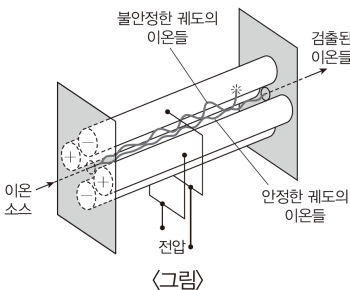
에디슨은 축음기를 발명할 때 소리는 사물의 진동에서 나오며 소리가 닿은 물체는 진동을 일으킨다는 간단한 음향학적 지식에 근거를 두었다. 에디슨이 변별적 자질을 갖는 모음과 자음이 주석 박에 강철 핀으로 독특한 홈을 남기고 그 홈을 움직여 강철 핀을 진동시켰을 때 원래의 소리를 변별력 있게 재생할 수 있었던 것은 당시 음의 감각 원리를 이해하려고 노력 중이던 음향학자들의 눈에는 예상을 뛰어넘는 운 좋은 성취였다.

과학·기술 13 4중 극자 질량 분석기 (216p)

질량 분석기는 이온화된 원자나 전기를 띤 입자의 질량, 또는 더 정확하게 질량 대 전하량 비(m/z)를 측정하는 데 사용되는 장비이다. 질량 분석기는 화학, 생물학, 법의학, 의학 실험실에서 시료의 구성 성분을 결정하고 특정 원소의 동위원소 비율을 측정하거나 오염을 확인하기 위해 사용된다. 최초의 질량 분석기는 전기장과 자기장을 사용하여 질량 분석기 내부에서 이온의 궤적을 조정하여 질량 대 전하량 비를 측정했다. 그러나 이런 방식은 안정적이고 균일한 자기장을 달성하기 어려워 질량 분해능*의 저하를 초래했다. 이에 파울은 2개의 양 전극과 2개의 음 전극을 번갈아 배치하는 방식으로 자기장 사용을 완전히 배제하는 기술을 개발하여 기존의 질량 분석기를 개선하였다. 이 방식은 안정성이 높고 질량 분해능이 우수하여 천연유기 화합물의 구조 분석에 널리 활용되고 있다.

㉠ 4중 극자 질량 분석기는

<그림>과 같이 동일한 직경과 길이를 갖는 금속 막대 4개가 이웃한 막대와 같은 간격을 유지하며 수평 방향으로 평행하게 배치되어 질량 필터를 구성한다.



이 질량 필터의 양쪽 끝

사이에는 전기장이 걸려 있어 이온을 전기력으로 가속하는 이온 가속기를 구성한다. 질량 필터의 한쪽 끝에는 이온 발생원이 있고 다른 쪽 끝에는 이온 검출기가 있다. 질량 필터를 구성하는 4개의 금속 막대를 단면에서 보면 정사각형 모양으로 4개가 배열되어 있는데 가로축상에 위치한 두 금속 막대에는 같은 전압 $U+V(t)$ 가 걸리고, 세로축상에 위치한 두 금속 막대에는 같은 전압 $-(U+V(t))$ 가 걸린다. 여기서 U 는 양의 직류 전압, $V(t)$ 는 사인 곡선을 그리며 계속 변하는 교류 전압이다. 이렇게 걸린 전압은 4개의 막대 사이를 축 방향으로 비행 경로를 따라 이동하는 이온의 궤적에 영향을 미친다. 적절한 직류 전압과 교류 전압이 주어지면 특정한 질량 대 전하량 비를 갖는 이온만 4중 극자 질량 필터를 통과하고 다른 모든 이온은 질량 필터를 통과하지 못하고 전극에 충돌한다. 걸어 주는 전압을 다르게 하면서 질량 필터를 통과하여 이온 검출기에 도달하는 이온을 모니터링하여 질량 스펙트럼을 얻을 수 있다.

4중 극자 질량 필터의 일반적인 작동 원리는 다음과 같이 단순화하여 설명할 수 있다. 가벼운 이온, 즉 질량 대 전하량 비가 작은 이온은 전기장의 교류 성분에 따라 경로에서 벗어나 진동하는 성향을 ㉡때지만 무거운 이온, 즉 질량 대 전하량 비가 큰 이온은 교류 성분에서 반응이 용이하지 않아 경로를 유지하는 성향을 띤다. 이온 발생원에서 나온 양이온이 4개의 금속 막대의 축에서 같은 거리만큼 떨어진 중심축에 투입되면 모든 전극에서 받는 힘이 같아 어느 전극 쪽으로도 당겨지거나 밀려지지 않는다. 그러면 양이온이 중심축에서 약간 벗어나

지점에 투입되었을 때를 생각해 보자. 먼저 직류의 효과를 고려해 보면, 양의 직류 전압이 걸린 전극이 배치된 가로 방향의 경우 양이온이 어느 한 전극에 가까울수록 그 전극이 양이온을 중심축 방향으로 더 강하게 밀기 때문에 4중 극자의 중심축에는 ㉢안정한 평형점이 형성되게 된다. 그러므로 양이온이 중심축에서 가로 방향으로 벗어나면 다시 중심축으로 돌아오게 하는 힘을 받는다. 반면, 음의 직류 전압이 걸린 전극이 배치된 세로 방향의 경우 양이온이 어느 한 전극에 가까울수록 그 전극이 양이온을 그 전극이 있는 방향으로 더 강하게 당기기에 4중 극자의 중심축에는 ㉣불안정한 평형점이 형성되게 된다. 그러므로 양이온이 중심축에서 세로 방향으로 벗어나면 중심축에서 멀어지게 하는 힘을 받는다. 여기에 추가하여 교류 전압이 일으키는 효과가 있다. 가로 방향의 경우, 가벼운 양이온은 전압이 양과 음으로 계속 교대되는 교류에 의해 양쪽에서 밀거나 당겨지면 점점 더 큰 진폭으로 진동한다. 전극에 부딪치는 반면, 무거운 양이온은 교류에 의해 밀거나 당겨져도 진폭이 별로 커지지 않아 전극에 부딪지기 전에 4중 극자의 다른 쪽 끝에 도달한다. 따라서 가로 방향에 배열된 전극은 질량 대 전하량 비가 큰 양이온을 통과시키는 질량 필터이다. 세로 방향의 경우, 무거운 양이온은 중심축에서 조금만 벗어나도 불안정해져 교류의 추동*에도 불구하고 이내 전극에 부딪치는 반면, 가벼운 양이온은 중심축에서 벗어나면 교류 전압의 추동에 의해 다시 중심축으로 복귀해 안정화되어 4중 극자의 다른 쪽 끝으로 무사히 전송된다. 따라서 세로 방향에 배열된 전극은 질량 대 전하량 비가 작은 양이온을 통과시키는 질량 필터이다. 음이온이 이온 발생원에서 투입될 때에는 가로 방향과 세로 방향의 역할이 뒤바뀐다. 4개의 전극으로 이렇게 두 가지의 필터를 결합한 형태로 질량 필터를 만들어 교류 전압 대 직류 전압의 비 또는 교류 진동수를 적절하게 조절하면 질량 대 전하량 비가 특정한 값을 갖는 이온만 세로 방향이나 가로 방향의 전극에 충돌하지 않고 질량 필터를 통과할 수 있다.

* 질량 분해능: 질량 분석기가 비슷한 질량의 이온을 구별하는 능력.

* 추동: 물체에 힘을 가하여 앞으로 나아가게 하거나 흔들.