

흑연 영구자석 원리 밝혔다

글 | 이규원, 이철의 _ 고려대학교 물리학과 교수 rscel@korea.ac.kr

황제와 치우 사이의 전쟁을 다룬 신화 속에 '지남차'라는 것이 등장한다. 전쟁중에 열세에 몰린 치우가 안개를 불러 황제군의 눈을 가리자, 황제는 항상 남쪽을 가리키는 지남차를 만들어 길을 열었다고 한다. 이 지남차는 현대의 나침반과 같은 것으로 자석의 역사가 매우 오래되었다는 것을 말해준다. 나침반의 바늘이 (자석) 항상 한 방향만을 가리키는 것은 지구도 역시 하나의 거대한 자석이기 때문이다. 자석은 북극과 남극으로 구성되어 있는데 서로 다른 극끼리 당기고 같은 극끼리는 밀친다. 따라서 나침반의 북극이 가리키는 방향은 사실은 남극이다. 하지만, 전통적으로 나침반 바늘의 북극이 가리키는 방향을 지구의 북극이라 칭한다.

활발히 진행돼온 금속자석 대체 유기물 자석 연구

자석의 세기는 자석 표면에서의 자기장 세기로 나타내는데 자석으로부터의 거리가 멀어질수록 자기장이 약해지기 때문이다. 지구 자기장은 대략 1가우스 정도다. 전자제품의 경우 수십 가우스 정도의 자기장을 가지고 있고, 막대자석이나 말굽자석 등의 완구용 자석은 수백 가우스의 자기장을 가지고 있다. 신용카드와 자기기록매체 등에 사용되는 마그네틱 바는 수천 가우스의 자기장을 가지고 있다. 자기기록매체에 사용되는 자석의 자기장이 높은 이유는 당연히 저장된 정보가 쉽게 손실되지 말아야 하기 때문이다. 가장 좋은 것은 그 정보가 영구적으로 보존되는 것일 것이다. 한번 자석의 성질을 가지게 되면 영구적으로 자석인 물질을 영구자석이라 부른다. 나침반이나 자기기록매체에 사용되는 자석들은 모두 영구자석들이다. 흔히 상온에서도 (20~40℃ 정도) 영구자석인 물질들이 간단히 자석이라 불려진다.

예로부터 알려진 천연 자석들은 자철광 같은 금속을 포함하는 암석이였다. 지금도 자석의 대부분은 철 등의 금속으로 이루어진 합금이거나 산화물이다. 이런 철 자석들은 매우 높은 온도까지(1천℃ 정도) 자석의 성질을 잃지 않으면서도 강한 자기장을 가지고 있다. 철보다 무거운 금속으로 만들어진 네오뎀 자석 혹은 사마륨 자석은 철 자석보다 센 자기장을 가지고 있지만 자석의 성질이 유지되는 온도가 상대적으로 낮다(수백℃ 정도). 금속 자석들은 강한 자기장을 가지면서도 단단하고 높은 온도에서도 안정하지만, 잘 휘어지지 않고 무거우며 전기를 매우 잘 통한다. 금속 자석 가루를 고무나 플라스틱에 섞어서 만든 자석을 고무 자석 혹은 플라스틱 자석이라 부른다. 이들은 잘 휘어지고 성형이 용이하다. 고무 자석은 완구나 가정용 제품에 많이 사용되고 있는데, 가정용 가위를 사용하여 재단이 가능하지만 열에 강하지 못하고 자기장이 약하다. 이처럼 금속 자석과는 다른 장점을 가지는 유기물 자석을 찾고자 하는 시도가 오랫동안 계속돼 왔다.

1970년경부터, 전기를 통하는 합성섬유라고 할 수 있는 전도성 고분자 등의 유기원소들로 구성된 물질들이 자석이 될 수 있다는 이론이 발표되었다. 이후 1990년경부터 여러 가지 형태의 유기 물질 혹은 유기-무기 혼합 물질들로 구성된 자석들이 다수 보고 된다. 그러나 이들 대부분이 극저온에서만 (-270℃ 정도) 자석의 성질을 유지한다. 보고된 유기 자석들 중에는 탄소로만 이루어진 물질들도 다수 포함되어 있었다.

플러린·탄소나노튜브·흑연 등에서 자석성질 발견

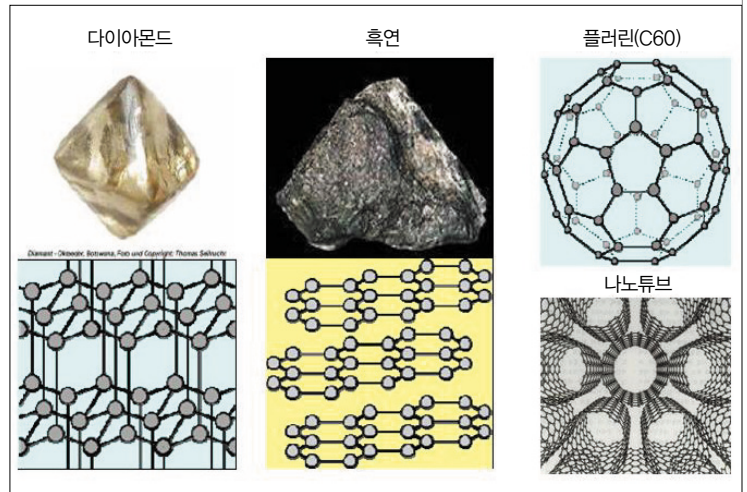
탄소는 다양한 물질형태를 취한다. 다이아몬드와 흑연은

오랫동안 인류와 친숙한 형태의 탄소 물질로서, 흑연의 천연 단결정은 다이아몬드의 천연 단결정보다 발견하기 어렵다고 한다. 지금도 널리 사용되는 숯 역시 대표적인 탄소 물질로서, 그 안에는 다양한 탄소형태가 존재한다. 그 외에도 탄소 원자 60개가 축구공모양으로 결합된 풀러린(C₆₀), 나노크기의 관 형태를 취하는 탄소 나노튜브 등이 지난 10여년 사이에 새로이 발견된 탄소의 물질형태다. 원자가 규칙적인 배열을 갖지 않는 비정질 탄소 역시 오랫동안 알려진 탄소의 물질형태다.

1990년경, 인공적으로 합성된 흑연 칩 수소가 달라붙은 비정질 탄소는 상온에서도 자석이 된다는 것이 발견되었다. 이 당시부터 탄소 자석에 대한 논쟁이 시작되었는데, 주된 논점은 “자석의 성질이 탄소에서 발현된 것인가 아니면 함유된 금속 불순물에 의한 것인가”였다. 비슷한 시기에 유기물이 달라붙은 풀러린이 극저온에서 자석이 된다는 사실이 보고되었다. 1990년대 중반에는, 빛을 쬐어 산소가 달라붙게 만드는 광산화반응을 경험한 풀러린이 500℃ 정도까지 자석의 성질을 보인다는 것이 발견된다.

라이프치히 대학의 에스퀴나지 교수는 2000년대를 탄소 자석 발견의 르네상스라 부른다. 합성기술의 발달은 고순도 탄소 물질을 합성할 수 있게 하여, 탄소 물질에서 발견된 자석의 성질이 금속 불순물에 의한 것이 아니라는 사실을 입증할 수 있었다. 2000년대의 탄소 자석 발견은 에스퀴나지 교수를 비롯한 몇몇 연구 집단에 의해 주도되었다. 100만분의 1m 이하의 두께를 가지는 얇은 풀러린 박막에서 약 200℃까지 자석의 성질이 유지되는 것이 발견되었고, 탄소의 새로운 물질형태라 불리는 탄소 나노폼에서도 자석의 성질이 발견되었다. 에스퀴나지 교수 연구팀에서는 양성자(수소의 원자핵) 빔에 쬐여진 흑연에서 자석의 성질이 200℃까지 유지된다는 것을 발견하였다.

비슷한 시기에 탄소 물질이 자석이 되는 원리를 규명하려는 이론적인 시도들도 다수 등장했다. 수소가 흡착된 나노크기의 흑연이 자석이 될 수 있다는 이론과 나노크기의 흑연이 휘어졌을 때 자석이 될 수 있다는 이론이 발표되었고, 다이아몬드 결합과 흑연 결합의 적절한 혼재가 탄소 물질을 자석으로 만드는 원인이라는 이론도 발표되었다. 하지만 탄소 물질이 자석이 되는 원리는 여전히 확증되지 않은 문제로 남아

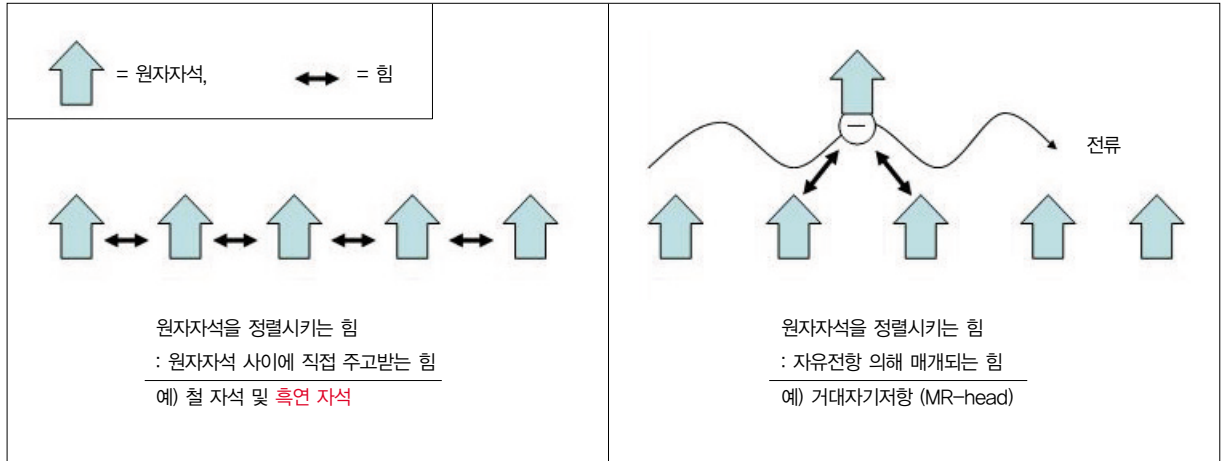


있었다.

흑연자석 이용시 초정밀·초경량 자기기록매체 가능

현재, 정교한 집적회로를 반도체 기판에 인쇄하는 방법은 광 리소그래피, 혹은 전자빔 리소그래피 등이다. 하지만 보다 정교한 인쇄를 위한 차세대 리소그래피 방법으로는 이온빔 리소그래피가 주목받고 있다. 이온빔 리소그래피는 마이크로미터 이하의 직경을 가지는 이온빔을 사용하여 정교한 문양을 새기는 방법이다. 양성자 빔을 이용한 흑연 자석의 제작은 양성자빔 리소그래피와 결합되었을 때, 초정밀 초경량의 자기기록매체를 가능하게 한다. 탄소는 철 등의 금속에 비해 5~10배정도 가볍다. 탄소자석을 자기기록매체로 사용할 경우 상당한 중량의 감소효과를 거둘 수 있다. 지금도 경량 노트북의 제작이나 비행기 외형 등의 중량 감소가 요구되는 분야에서는 금속대신에 탄소섬유가 사용되고 있다. 금속 자석을 사용하던 자기기록매체가 탄소자석으로 대체되면 초경량의 노트북이 가능해지고 비행기와 우주선 등에서는 매우 큰 비용절감 효과를 낼 수 있다.

자석은 북극과 남극으로 구성되어 있으며 북극과 남극을 분리할 수 없다. 자석을 반으로 쪼개면 크기만 반으로 줄어 들었을 뿐인 두개의 자석을 얻게 되고 각각의 자석은 여전히 북극과 남극으로 구성된다. 자석을 계속 쪼개면 점점 더 작은 크기의 자석을 얻게 된다. 자석을 계속 쪼개어 더 이상 쪼갤 수 없는 크기의 자석에 도달했을 때 이 자석을 더 이상 쪼



갤 수 없는 자석, 즉 원자자석이라 부를 수 있다. 실제로는 전자의 스핀이 원자자석에 해당한다.

전자의 스핀은 전하와 마찬가지로 입자의 기본 성질이다. 전하는 전기의 기본 단위이고 스핀은 자석의 기본단위라고 생각할 수 있다. 이런 원자자석들이 무작위한 방향으로 흩어져 있으면 자석에 붙는 쇠붙이 같은 물질이 된다. 원자자석들이 한 방향으로 정렬하게 되면 일상생활에서도 볼 수 있는 자석을 만든다. 원자자석 두 개가 짝을 이루면 반드시 반대 방향을 향하게 되어 두 자석의 자기장이 상쇄되어 버린다. 이런 물질은 자석도 아니고 자석에 붙지도 않는다. 나무 혹은 비닐과 같은 물질들이 이에 해당한다.

자유전하는 자유롭게 이동할 수 있어서, 전압이 걸리게 되면 높은 전압에서 낮은 전압쪽으로 이동하면서 전기를 형성한다. 자유전하에 결합되어 있는 원자자석도 있으나 자유전하의 원자자석은 자유롭게 움직이다보니 평균거리가 멀어 한 방향으로 정렬되기 어렵다. 따라서 고정되어 있고 짝짓지 않은 원자자석들이 한 방향으로 정렬될 때 자석이 된다고 볼 수 있다. 흑연에 존재하는 고정된 원자자석들은 모두 짝지어 있다. 흑연에는 자유전하가 존재하여 전기를 잘 통하지만 이 자유전하에 결합된 원자자석들은 한 방향으로 정렬되기 어렵다. 자석의 성질이라는 측면에서 보면 흑연은 나무나 비닐에 가깝다.

따라서 자석이 되기 위해서는 짝짓지 않은 원자자석과 이 원자자석들을 한 방향으로 정렬시키는 힘이 필요하다. 흑연

의 단결정에는 짝짓지 않은 원자자석이 존재하지 않는다. 따라서 흑연이 자석이 되었다고 할 때 두 가지의 의문이 생긴다. 짝짓지 않은 원자자석이 형성되는 원인과 이런 원자자석들을 한 방향으로 정렬시키는 힘이다. 기존에 발표된 탄소 자석에 관한 이론들의 대부분은 흑연에서 원자자석이 형성되는 원인을 추구하고 있다. 흑연에 양성자 빔을 쬐어줄 때는 자석이 되지만 헬륨의 원자핵을 쬐어주었을 때는 자석이 되지 않는다. 따라서 수소가 원자자석의 형성에 관련될 것이라는 추측이 탄력을 받았다. 하지만, 탄소와 결합된 수소가 직접 원자자석을 형성하는지 혹은 수소가 직접 관여하는 것은 아니고 양성자의 충돌에 의해 만들어진 탄소의 결함, 즉 결정에서 규칙적으로 배열되어야 할 원자가 빠진 곳이 원자자석을 형성하는지는 새로운 논쟁거리가 된다.

‘전자상자성공명 방법’ 이용 영구자석되는 원리 규명

고려대학교 이철의 교수 연구팀은 양성자 빔에 쬐여진 흑연이 자석이 되는 원리를 규명하기 위해 전자상자성공명 방법을 사용했다. 전자상자성공명 방법은 물질내의 짝짓지 않은 원자자석을 외부의 자석을 사용하여 정렬시킨 후에, 전자파를 가해서 원자자석의 반응을 관찰하는 방법이다. 전자상자성공명 방법의 원리는 병원에서 사용되는 MRI와 같으며, 근래에는 정밀한 연대측정방법으로도 각광받고 있다. 양성자 빔에 쬐여지기 전의 흑연에 대한 전자상자성공명 연구는 50여년 전부터 활발하게 연구되고 있었다. 양성자 빔

에 쪼여지기 전의 흑연에 관한 전자상자성공명 연구는 흑연에 존재하는 짝짓지 않는 원자자석들이 모두 자유전하에 결합된 것들이라는 것을 보여준다. 중성자 빔에 쪼여진 흑연에 대한 전자상자성공명 연구로부터, 중성자 빔에 쪼여진 흑연에서 자유전하의 농도는 증가하지만 여전히 원자자석은 자유전하에 결합된 것이라는 것이 밝혀졌다. 이것은 반도체에 불순물을 첨가해서 자유전하의 농도를 증가시키는 것과 유사하다. 중성자 빔에 쪼여진 흑연에 존재하는 원자자석이 모두 자유전하에 결합된 것이라는 사실로부터 당연히 알 수 있는 것이지만, 중성자 빔에 쪼여진 흑연은 자석이 되지 않는다.

이철의 교수 연구팀의 전자상자성공명 연구결과에 따르면, 양성자 빔에 쪼여진 흑연에서는 자유전하의 농도가 증가하고 따라서 자유전하에 결합된 원자자석의 농도도 증가한다. 그뿐 아니라 양성자 빔에 쪼여진 흑연에서는 결합에 고정되어진 상당량의 짝짓지 않는 원자자석이 확인되었다. 따라서 탄소(흑연)자석의 형성 원리에 관한 이론적 논쟁에 실험적 증거를 제출할 준비가 되었다. 수소와 결합된 원자자석의 전자상자성공명 신호에는 수소에 의한 미세구조라는 복잡한 신호가 검출되어야 한다. 하지만 양성자 빔에 쪼여진 흑연에서는 미세구조가 관측되지 않았고 이는 수소가 원자자석의 형성에 직접 관련된다는 주장에 부정적인 증거다. 높은 에너지의 양성자 빔에 의해 형성된 결합이 원자자석의 형성 원인으로 여겨지며, 양성자는 환경을 조성할 뿐 원자자석에 직접 결합된 것은 아닌 셈이다.

‘원자자석 사이에 직접 작용하는 힘’ 이 흑연자석 형성

위에서 설명한 것처럼 자석이 되기 위해서는 원자자석을 한 방향으로 정렬시키는 힘이 필요하다. 양성자 빔에 쪼여진 흑연에서 원자자석의 형성 원인을 확인할 수 있었으니 그 다음 문제는 원자자석들을 정렬시켜 자석으로 만드는 힘을 확인하는 것이다. 원자자석을 정렬시키는 힘은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 원자자석들 사이에 직접 작용하는 힘이고 다른 하나는 자유전하의 원자자석에 의해 매개되는 힘이다. 철 등의 금속자석 대부분에서 원자자석들 사이에 직접 작용하는 힘이 원자자석들을 정렬시킨다. 자유전하로 매개되는 힘에 의해 자석이 되는 물질들은 대부분 자기저항 물질

들이다. 자기저항은 자기장에 의해 전기를 통하는 정도가 달라지는 현상을 가리키는데, 자기기록매체에서 저장된 정보를 읽는 장치에 사용된다.

양성자에 쪼여진 흑연에서 발견되는 두 신호는, 즉 자유전하에 결합된 원자자석의 신호와 결합에 고정된 원자자석의 신호는, 온도와 자기장을 변화시킬 때 완전히 독립적인 행동을 보여준다. 두 종류의 원자자석들 사이에 아주 강한 힘이 작용하고 있으면, 두 종류의 원자자석은 전자상자성공명 신호에서 구별되지 않고 하나의 신호만을 보여준다. 약하더라도 두 종류의 원자자석 사이에 힘이 작용하고 있다면 각각에 대응하는 전자상자성공명 신호는 비슷한 거동을 보일 것이다. 따라서 양성자에 쪼여진 흑연에서는 자유전하에 결합된 원자자석과 결합에 고정된 원자자석 사이에 아무런 힘이 작용하지 않는다는 사실을 알 수 있고, 철 등의 금속자석에서처럼 원자자석 사이에 직접 작용하는 힘이 흑연자석을 형성하는 힘이라는 사실이 규명되었다.

이제 흑연자석의 형성원리를 이해하게 됨으로써, 탄소자석의 개발과 응용도 더욱 활기를 띠게 될 것으로 여겨진다. 요즘 시중에서는 ‘자석요’가 건강에 좋다면서 고가에 팔리고, 다른 한편에서는 ‘참숯요’라는 것이 원적외선을 방출한다고 역시 고가에 팔리고 있다. 우스개지만, 탄소자석은 ‘자석참숯요’를 시중에 등장시켜 훨씬 고가에 팔리게 할지도 모를 일이다. ㉔



글쓴이는 이규원은 고려대학교 물리학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위와 박사학위를 받았다. 전주대학교 연구소 교수를 거쳐, 현재는 고려대학교 나노 융합계 연구단의 연구교원으로 재직중이다.



글쓴이 이철의는 서울대학교 물리학과 졸업 후 The Ohio State University에서 석사학위와 박사학위를 받았다. University of Pennsylvania 박사후 연구원을 거쳐 현재 고려대학교 물리학과 학과장으로 재직중이며 고려대학교 BK21 물리학 사업단장 및 나노과학연구소장을 겸임하고 있다.