

■ 편집자 주

‘인류에게 가장 큰 이익을 가져다준 발견’에 주는 상, 노벨상은 어떤 주제에 주목하고 있을까요? 스웨덴 왕립과학원이 여는 노벨 심포지엄의 주제 가운데 5년 이내에 노벨상을 수상할 가능성이 높은 연구를 자세히 살펴봅니다.



세상을 움직이는 가장 강한 자석,

네오디뮴 영구 자석

자석은 우리의 삶은 물론 현대 사회를 일궈낸 매우 중요한 물질입니다. 발전소와 전기차의 모터부터 스마트폰의 작은 부품에까지 전방위로 쓰이고 있습니다. 더 작고 가벼우면서도 강한 자기력을 내도록 만드는 게 오늘날 자석 기술의 핵심 과제죠. 노벨 물리학상 예비 후보로 언급되는 강력한 네오디뮴 영구 자석에 대해 자세히 알아봅니다.

글 김미래 기자 + 디자인 이형룡

네오디뮴 자석은 세상에서 가장 강한 영구 자석입니다. 자석 무게의 수천 배에 달하는 자성 물질과 상호작용할 정도로 강하죠. 덕분에 작고 정밀한 기계 속에서도 놀라운 힘을 낼 수 있습니다. 스마트폰이 얇고 가벼워질 수 있었던 것, 전기차가 내연기관차를 대체할 수 있는 것, 바람이 전기로 바뀌는 효율이 높아진 것 모두 이 자석 덕분입니다.

네오디뮴 자석이 노벨 물리학상 후보로 거론된 것은 최근 노벨 물리학상의 수상 경향과 관련 있습니다. 2024년에는 인공 신경망을 이용한 기계 학습을 가능하게 한 연구자들이, 2023년에는 물질의 전자 세계를 탐구하는 아토초 빛 펄스를 생성하는 실험 방법을 제시한 과학자들이 상을 받았습니다. 우리 삶에 유용하게 쓰이고, 더 나아가 사람들의 삶을 바꾼 연구에 노벨상을 주는 흐름을 보여줍니다. 김갑진 KAIST 물리학과 교수는 “최근 노벨 물리학상의 흐름은 세상을 이미 바꾼 실용화된 과학”이라며 “그 대표적인 예가 우리의 일상생활에서 빠질 수 없는 네오디뮴 영구 자석일 수 있다”고 설명했습니다.

사가와 마사토 전 스미토모 특수금속 연구원과 존 크로엣 전 GM

리서치 센터 연구원이 네오디뮴 자석으로 노벨 물리학상을 받을 가능성이 있습니다. 두 사람은 일본과 미국에서 독자적으로 네오디뮴 자석을 개발했고, 현대 자석 기술의 새 시대를 열었죠.

사가와 연구원은 일본 스미토모 특수금속에 재직하던 1982년, 네오디뮴과 철, 붕소로 만든 $Nd_2Fe_{14}B$ 라는 조성의 자석을 처음으로 고안하고 상온 소결 방식으로 제조했습니다. 이 자석은 이전까지 가장 강한 자석으로 꼽히던 사마륨-코발트(SmCo) 자석보다 강한 자기력을 내면서, 외부 자기장에 의해 자성을 잃지 않는 강점을 보였습니다. 특히 비싼 코발트 대신 값싼 철을 사용한 것이 혁신이었죠.

크로엣 전 연구원은 1982년, 미국 제너럴 모터스(GM) 리서치 센터에 재직 중 네오디뮴 자석을 분말화한 뒤 고분자 소재와 혼합해 성형하는 ‘본디드 자석’ 제조 방식을 개발했습니다. 급속 냉각을 통해 다양한 형태의 자석을 쉽게 만들 수 있는 이 방식은 네오디뮴 자석 생산 공정 방식에 혁신을 불러 일으켰고, 그의 성과는 네오디뮴 자석의 산업적 응용 가능성을 크게 넓혔다는 평가를 받고 있습니다.

네오디뮴 영구 자석 노벨상 수상자 예측



Japan Prize / yu.makino

사가와 마사토

전 일본 스미토모 특수금속 연구원
#네오디뮴 자석의 개척자



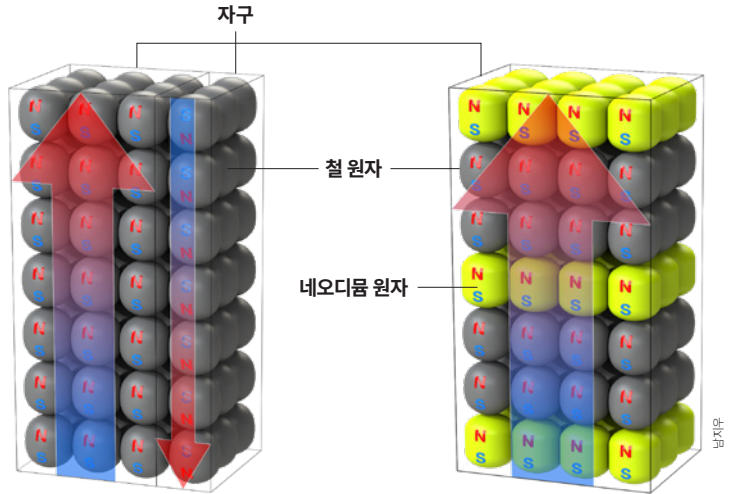
Honda Prize 2023 Press Release

존 크로엣

전 미국 GM 리서치 센터 연구원
#자유롭게 가공 가능한 본디드 자석 제조

네오디뮴 자석이 강한 이유

금속에 자석을 가져다 대면 그 금속도 자석이 된다. 이때 금속 원자들의 자기장 방향은 자석의 자기장 방향과 평행하게 배열된다. 자기장의 방향이 같은 원자들의 집단을 '자구(magnetic domain)'라고 부른다. 철은 강자성체이지만 일부 원자들이 다른 방향으로 자기력을 발휘하고 있다. 인접한 자구의 자기장 방향이 같으면 자기력은 보강되고, 자기장 방향이 다른 자기력은 상쇄된다. 철 원자로만 이뤄진 금속에 네오디뮴 원자를 배치하면, 네오디뮴 원자가 잘 회전하지 않는 특성 때문에 자구가 크게 형성되고 오랫동안 유지된다.



인류 혁명의 주역, 자석

자석은 인류 역사에서 혁신의 순간마다 중요한 역할을 해왔습니다. 기원전 4세기경 중국에서 등장한 자석을 이용한 나침반은 항해술과 지리학의 발전을 이끌었고, 훗날 유럽의 대항해 시대를 여는 데 결정적 기여를 했습니다. 인간은 고립된 땅에만 머무르지 않고, 자석의 힘을 빌려 바다를 건너며 세계를 연결하기 시작했죠.

두 번째 전환점은 19세기, 전기와 자기를 과학적으로 연결한 전자기학의 탄생입니다. 1820년 한스 외르스테드는 전류가 자기장을 만든다는 사실을 밝혔고, 1831년 마이클 패러데이는 자기장의 변화가 전류를 유도한다는 원리를 발견했습니다. 이 두 발견은 전동기와 발전기의 핵심 원리가 됐으며, 1864년 제임스 맥스웰은 이를 수학적으로 통합해 전자기파 개념을 완성했습니다. 일련의 발견은 우리가 전기를 만들고, 보내고, 무선 통신을 하는 것까지 모두 가능하게 만든 이론적 기초가 됐습니다. 자석은 그 중심에서 전동기, 발전기, 통신 장비 등 2차 산업혁명을 움직이는 핵심 부품입니다.

오늘날 4차 산업혁명의 한가운데에도 여전히 자석이 있습니다. 로

봇, 드론, 전기차처럼 작고 정밀한 움직임이 요구되는 기술은 그만큼 강력한 자석을 필요로 하죠. 그 주인공이 바로 네오디뮴 영구 자석($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)입니다. 인류가 만든 자석 중 가장 강한 이 자석은 작고 가벼우면서도 높은 자기력을 지녀 스마트폰, 전기차, 풍력 발전기, 의료기기 등 첨단 기술 전반에 활용됩니다. 이우영 연세대 신소재공학과 교수는 “네오디뮴 영구 자석은 21세기 첨단 기술을 빠르게 발전시키는, 인류 역사상 가장 위대한 발명품 중 하나”라고 말했습니다.

전자의 스핀으로 만드는 자석, 네오디뮴을 넣어 더 강하게

네오디뮴 영구 자석이 어떻게 가장 강한 자성을 띠는지 알기 전에, 먼저 자석이 어떻게 만들어지는지 알아봅시다. 자석은 전자의 움직임에서 탄생합니다. 모든 물질은 원자로 이뤄지고, 원자 안에는 전자가 끊임없이 움직이고 있습니다. 이 전자들은 회전하는 성질인 ‘스핀’을 가지고 있습니다. 이 회전에 의해 전자에 자기장 방향이 생기고, 자기력이 발생하죠. 덕분에 원자 하나하나가 마치 작은 자석처럼 행동합니다.

하지만 대부분의 물질에서는 전자들의 스핀 방향이 서로 엇갈려 있

어서 자성이 생깁니다. 다닥다닥 붙어있는 전자들을 떠올려봅시다. 여기서 한 전자가 시계 방향으로 스핀을 하면, 다른 전자는 반시계 방향으로 스핀하고, 그 결과 서로의 자성을 지워버리게 됩니다. 때문에 우리 주변에 있는 대부분의 물질은 자석처럼 보이지 않습니다.

하지만 철(Fe), 니켈(Ni), 코발트(Co) 같은 물질은 다릅니다. 이 물질들은 전자가 한 방향으로 스핀을 정렬하려는 경향이 강합니다. 이 금속 안에는 자기장의 방향이 같은 원자의 집단인 '자구'라는 구조가 있고, 자구 영역 내의 전자들은 일정한 방향으로 정렬돼 작은 자석처럼 행동하죠. 이런 특성을 가진 물질을 '강자성체'라고 합니다.

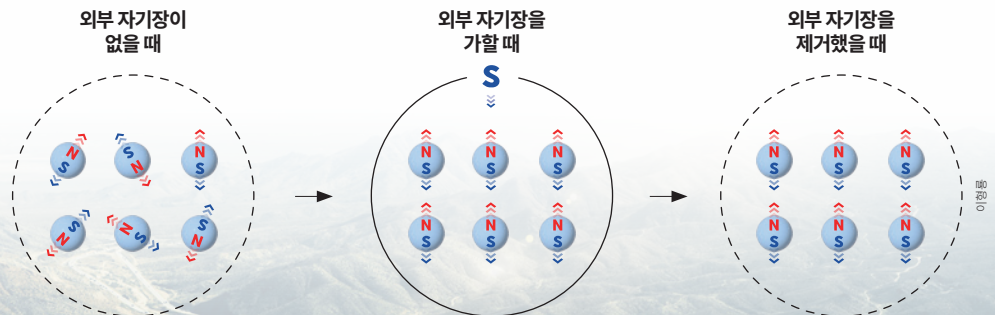
강자성체는 외부에서 강한 자석을 대면 자구들의 자기장 방향이 한쪽으로 정렬되면서 거대한 자석처럼 바뀝니다. 이 과정을 '자화'라고 합니다. 과학 수업 시간에 볼 수 있는 말굽자석 같은 영구 자석을 만들

때는 이런 자화 과정을 인위적으로 거치게 합니다. 이런 강자성체 금속을 뜨겁게 가열한 후 강한 자기장을 걸고 천천히 식히면, 전자들의 정렬 상태가 고정돼 외부 자기장 없이도 자성을 유지하는 '영구 자석'을 만들 수 있죠.

20세기 중반, 인류는 최초로 알루미늄, 니켈, 코발트를 조합한 '알니코' 자석이라는 인공 영구 자석을 개발했습니다. 다만 이 방식은 자기력이 비교적 약하고 고온에서 자성을 쉽게 잃는다는 단점이 있었습니다. 이를 보완하기 위해 저렴하고 내식성이 뛰어난 '페라이트 자석', 고온에서도 자성을 유지할 수 있는 '사마륨-코발트(SmCo) 자석'이 연달아 개발됐습니다. 특히 사마륨-코발트 자석은 당시 상용 자석의 몇 배에 달하는 자성을 지닌, 당시로서는 가장 강력한 자석이었죠. 하지만 사마륨-코발트 자석은 비싼 금속인 코발트를 많이 써야 했기 때문에 만드는

강자성체

강자성체는 외부 자기장이 없는 상태에서 자화되는 물질을 의미한다. 대표적인 강자성체인 철은 내부에 스핀 정렬이 제각각인 자구가 모인 상태다. 이때 외부 자기장을 가해주면 자구들의 자기장 방향이 한쪽으로 정렬돼, 이후에는 자기장을 제거해도 영구 자석의 성질을 가진다.



미국의 희토류 채굴 광산인 마운틴 패스 광산. 네오디뮴이 채굴되고 있다.

이정복

Tmy350(W)

네오디뮴 영구 자석을 만든 결정적 논문 2



특허·기술권영영

논문 제목 New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe

(네오디뮴과 철을 기반으로 한 새로운 영구 자석 재료)

게재 저널 응용 물리학 저널(Journal of Applied Physics) (1984년)

피인용수 3571회

연구 의의 고성능 Nd-Fe-B 자석을 세계 최초로 구현하고, 대량 생산 가능한 제조 공정과 물리적 기초를 제시한 선구적 연구
_ 이우영(연세대 신소재공학과 교수)

1984년, 사가와 마사토 박사는 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (네오디뮴-철-붕소) 조성의 영구 자석에 대한 논문을 발표합니다. 이 자석은 기존의 사마륨-코발트(Sm-Co) 자석에 필적하거나 이를 뛰어넘는 자기 성능을 지녔음에도 불구하고, 더 저렴하고 희귀 금속 의존도가 낮다는 점에서 큰 주목을 받았습니다.

연구팀은 Nd(네오디뮴), Fe(철), B(붕소)를 포함한 새로운 정방정계 결정 구조의 삼원계 합금을 소결 방식을 사용해 합성에 성공했습니다. 금속 분말을 고온에서 성형하고, 외부 자기장을 걸어 자화 방향을 정렬한 후 진공 소결하는 방식이었죠. 이 방식으로 만들어진 자석은 당시 세계에서 가장 높은 자속 밀도와 보자력을 기록하며, 기존 사마륨-코발트 자석보다 뛰어난 성능을 보여줬습니다.

이 연구는 단순한 소재 개발을 넘어, 고자력 자석을 대량 생산할 수 있는 소결 공정 기술을 제안했다는 점, 네오디뮴 자석의 결정 구조를 분석해 그 물리적 특징을 파악했다는 점에서 큰 학술적 의의가 있습니다.



특허·기술권영영

논문 제목 High-Energy Product NdFeB Permanent Magnets

(고에너지 곱을 가진 NdFeB 영구 자석)

피인용수 618회

게재 저널 응용 물리학회지(Applied Physics Letters) (1984년)

연구 의의 본디드 NdFeB 자석을 통해 정밀 소형 자석 양산을 가능하게 한, 공정 혁신을 이끈 연구 _ 이우영(연세대 신소재공학과 교수)

1984년, 미국 제너럴모터스 리서치 센터 연구원이던 존 크로엣 박사는 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (네오디뮴-철-붕소) 조성의 고성능 자석을 금속 냉각법으로 제조하는 방법을 발표했습니다.

크로엣 박사가 개발한 자석은 사가와 박사가 개발한 고온 소결 방식과는 전혀 다른 접근 방식입니다. 크로엣 박사는 먼저 네오디뮴(Nd), 철(Fe), 붕소(B)로 이뤄진 NdFeB 합금을 고온에서 녹인 뒤, 이를 회전하는 금속 롤 위에 빠르게 분사하는 방식으로 금속 냉각시켰습니다. 이 과정을 통해 합금은 매우 얇고 길쭉한 금속 리본 형태로 응고되며, 내부에는 비정질 또는 매우 미세한 결정 조직이 형성됩니다.

이렇게 만들어진 리본을 다시 잘게 부숴 분말 형태로 가공하고, 이 분말을 플라스틱 수지나 고분자 결합제와 섞어 다양한 형태로 압축 성형합니다. 이 방식으로 만들어진 자석을 '본디드 자석'이라 부릅니다. 본디드 자석은 가공이 자유롭고 복잡한 형상에도 적용할 수 있다는 장점이 있죠. 정밀한 부품이 필요한 소형 전자기기나 하드디스크 구동장치처럼, 자석이 작고 정밀해야 하는 분야에 최적화된 제조 기술로 평가받고 있습니다.



데 비용이 많이 들고 대량으로 만들기 어려운 단점이 있었습니다.

그러던 1982년, 일본의 사가와 마사토 연구원과 미국의 존 크로엣 연구원이 독립적으로 네오디뮴(Nd), 철(Fe), 붕소(B)의 조성을 가진 새로운 자석을 개발합니다. 그리고 각각 1984년, 논문으로 정리에 발표했죠. 두 사람이 만든 네오디뮴 자석은 그간 만들어진 어떤 자석보다도 자성을 유지하는 보자력이 높고, 훨씬 더 강한 자속 밀도와 안정된 결정 구조를 가졌습니다.

네오디뮴 자석이 강한 자성을 지닐 수 있었던 이유는 특별한 결정 구조 덕분입니다. ‘사방정계 결정 구조’죠. 사방정계 결정 구조는 정사각형 단면을 가진 기둥 형태로, 전자들이 한 방향으로 정렬되기 쉬운 환경을 만들어줍니다. 여기에 네오디뮴이라는 원소 자체의 성질도 중요하합니다. 네오디뮴은 ‘4f 전자 궤도’를 가지고 있어, 다른 원소보다 훨씬 더 강한 자기력을 만듭니다. 이 자기력이 철과 상호작용하며 자석 전체의 힘을 키워주죠. 이 교수는 “네오디뮴 자석은 같은 부피의 다른 자석보다 훨씬 더 강한 자기장을 만들어낼 수 있다”고 설명했습니다.

희토류 없이 만드는 더 강한 자석

전기차의 고성능 모터부터 병원의 MRI, 풍력 발전기, 드론, 청소기에 이르기까지. 네오디뮴 자석은 이미 일상 깊숙이 들어와 있습니다. 하지만 과학자들의 자석 연구는 끝나지 않았습니다. 이 교수는 앞으로의 과제로 “네오디뮴보다 더 강한 자석을 개발하거나, 희토류 없이도 강력한 자성을 구현할 수 있는 새로운 자석을 만드는 것”이라고 말했습니다.

네오디뮴은 대표적인 희토류 금속입니다. 2023년 기준 중국이 전 세계 희토류 매장량의 38%를 차지하고 있습니다. 생산량 역시 전체의 68.6%를 차지하고요. 매장 및 생산의 지역적 편중은 국제 정치와 경제에 영향을 미칩니다. 실제로 중국은 지난 4월 4일부터 미국의 관세 조치에 대응하기 위해 핵심 희토류 원소 7종에 대한 수출 통제를 본격화했습니다. 도널드 트럼프 미국 대통령이 쏘아올린 ‘관세 전쟁’에서 희토류가 협상 카드로 등장한 거죠. 때문에 과학자들은 자원 의존도를 낮추고 공급망의 불확실성을 줄이기 위해, 희토류 없이도 네오디뮴 자석 성능을 구현하는 자석을 개발하고 있습니다.



Joby Aero Inc.

네오디뮴 영구 자석은 항공 드론의 모터는 물론, 전기차, 풍력 발전기, 청소기에 이르는 일상 생활 전반에서 폭넓게 쓰이고 있다.

대표적으로 미국의 스타트업 니론 마그네틱스(Niron Magnetics)는 철과 질소를 기반으로 한 영구 자석을 개발 중입니다. 이 자석은 이론적으로, 네오디뮴 자석보다 두 배 이상 강한 자성을 만들어낼 수 있는 잠재력을 가진 것으로 알려져 있습니다. 다만 철-질소 기반 영구 자석은 외부 자기장에 의해 성질이 바뀌지 않고 보자력이 낮은 편인 데다, 온도 안정성이 떨어져 이를 개선하기 위한 연구가 계속되고 있습니다. 니론 마그네틱스가 개발 중인 철-질소 기반 영구 자석의 상용화 가능성을 높이 평가한 제너럴 모터스(GM)와 스텔란티스(Stellantis)는 이 회사에 총 3300만 달러(한화 약 4700억 원)를 투자했습니다.

한국에서는 2025년 2월, 이우영 교수와 한국재료연구원 등 공동연구팀이 값비싼 중희토류 없이 고성능 자석을 구현할 수 있는 ‘2단계 입계확산공정’을 세계 최초로 개발했습니다. 이 공정은 고온에서도 잘 녹지 않는 금속을 자석에 스며들게 하고, 저렴한 희토류를 다시 덧입힌 뒤 열처리하는 방식입니다. 중희토류는 영구 자석이 고온에서도 자성을 유지하는 데 필수적인 물질이지만 매우 희귀해 고가인데요. 이를 사용하지 않고 비교적 저렴한 희토류인 경희토류를 사용해 기존의 고가 자석과 비슷한 성능을 얻는 데 성공한 거죠.

이미 한 차례 세상을 바꾼 자석. 과학자들은 이제 또 한 번의 혁신을 향해 나아가고 있습니다. 작은 자석이 다시 한번 큰 시대를 움직이게 될 그날을 기대해 봅니다. 🌱