

‘절연체에도 전류 흐른다’ 규명 .. 현대물리 난제 풀어

글_ 김권용 연합뉴스 기자 kky@yna.co.kr

‘절연체에도 전기가 통할 수 있다’는 해묵은 가설이 최근 국내 연구진에 의해 세계 최초로 입증돼 각계의 비상한 관심이 모아지고 있다. 한국전자통신연구원 테라전자소자팀 김현택 박사는 지난 9월초 절연체에 미세한 전압을 가하면 전류가 통하는 금속물질로 바뀌는 ‘금속-절연체 전이(MIT, Metal Insulation Transition)’ 가설을 이론적으로 정리하고 실험을 통해 완성하는데 성공했다고 발표했다.

이는 노벨물리학상 수상자인 영국 케임브리지대학의 N.F. 모트 교수가 1949년 제시한 “어떤 금속물질의 경우 전자간에 서로 밀어내는 강력한 힘으로 인해 전류가 통하지 않는 절연체로 바뀔 수 있다”는 가설을 무려 56년만에 구체적으로 입증한 것이다.

금속-절연체 전이현상 세계 최초 규명

김 박사팀은 이를 증명하기 위한 연구과정에서 지난 1970년에 공개된 ‘금속-절연체 전이이론’, ‘브린크만-라이스 픽처’를 확장하는 ‘홀 드리븐 MIT 이론(Hole-Driven MIT Theory)’을 개발했다고 설명했다.

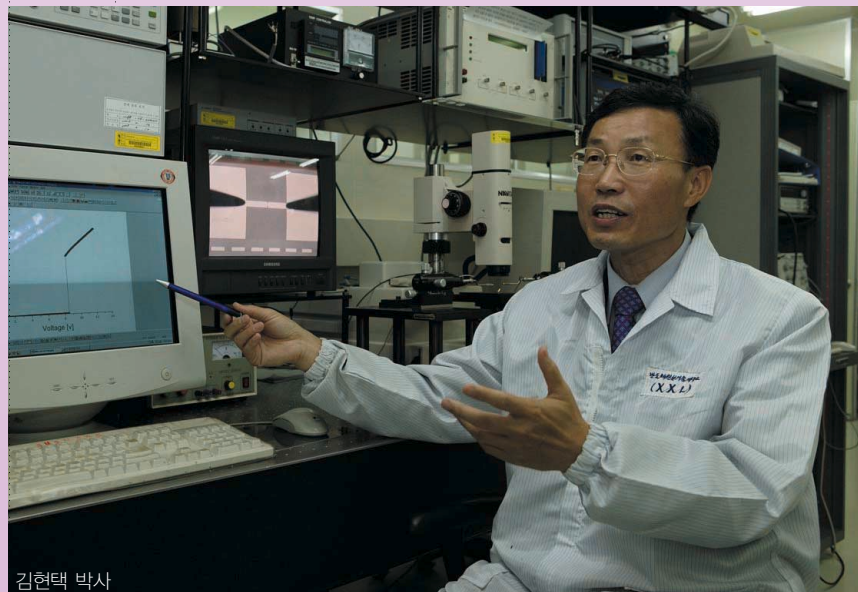
이번 연구에 쓰인 부도체는 바나듐옥사이드, 니켈옥사이드 등 산화물로 전류를 흘려보내지 못해 ‘모트 절연체’로 불리는 물질이다. 모트 절연체는 한 개의 원자에 한 개의 전자를 갖는 금속구조를 띠고 있으나 두 개의 전자 사이에서 서로 밀어내려는 이른바 ‘쿨롱에너지’가 매우 커서 전류가 흐르지 못한다.

모트 절연체에 매우 낮은 농도의 정공을 첨가, 전자를 빼내면 쿨롱에너지가 파괴돼 전자들이 움직이면서 전기가 통한다는 것이 김 박사팀이 개발한 ‘홀 드리븐 MIT 이론’의

핵심이다. 김 박사는 2개의 전자 사이에서 서로 밀어내려는 쿨롱에너지로 인해 전류가 흐를 수 없지만 미세한 전압을 가해 쿨롱에너지의 균형을 무너뜨리는 순간 전기가 흐르게 됐다고 밝혔다.

김 박사팀은 이번 연구를 위해 금속-절연체 전이형 소자를 제작하고, 전류-전압 특성 측정으로부터 불연속적인 점프인 ‘금속-절연체 전이 현상’을 직접 관측했다고 설명했다. 연구팀은 특히 물질 구조를 분석하는 ‘마이크로 라만 산란실험’으로 ‘구조 상전이(相轉移)’를 동반하지 않는 금속 절연체 전이현상을 확인, 세계 최초로 ‘모트 금속-절연체 전이현상’을 구체적으로 증명해보였다.

일반적으로 물질이 변하면 물질 구조도 덩달아 바뀐다. 하지만 이번에 규명된 ‘모트 금속-절연체 전이’는 물질의 구조적 변화를 동반하지 않으면서 갑자기 절연체에서 금속



김현택 박사



테스트 장면

으로 또는 금속에서 절연체로 '상전이' 하는게 특징이다. 이런 현상은 전기가 통하지 않는 공기 중에서도 번개가 치는 현상, 즉 절연파괴 현상의 원인으로 해석되고 있다.

김 박사는 모트 금속-절연체 전이현상이 쿨롱에너지가 크지 않은 물질로 알려진 화합물 반도체에서도 일어날 수 있음을 예언하는 한편 모트 금속-절연체 전이현상을 일으키는 새로운 기능의 '모트 트랜지스터'를 최초로 개발하는 실적도 올렸다고 공개했다. 특히 이번 실험에 쓰인 바나듐 옥사이드 등은 매우 흔한 물질이어서 향후 양산체제 구축에 어려움이 없을 것으로 보인다.

실리콘 반도체 기술 한계 극복 가능해져

'부도체에도 전기가 흐른다'는 모트 교수의 가설은 각국 과학자들이 앞 다퉈 규명을 시도했던 해묵은 연구과제였다. 하지만 전압의 강도 조절이 어려운데다 실험대상인 부도체 물질이 녹아내리는 등의 구조변화가 뒤따라 실패를 거듭했고, 56년의 긴 시간이 흐르면서 연구히 풀리지 않는 가설에 그치는 듯했다. 그러나 김 교수팀은 각고의 노력 끝에 구조변화 없이 전압을 안정적으로 조절할 수 있는 획기적인 기술을 통해 세계 최초로 금속-절연체 전이가설을 규명하는데 성공, '의문의 가설'을 둘러싼 논란에 종지부를

찍었다.

이에 따라 고체물리학의 큰 과제인 고온 초전도 현상과 거대 자기저항현상, 반도체에서의 자기저항 현상 등의 메커니즘 규명에 중요한 단서를 제공하고, 나아가 과학기술 분야에 큰 영향을 미쳐 새로운 기능소자 및 응용분야를 개척할 수 있게 됐다. 이 때문에 20세기에는 반도체 기술이 세계를 지배했지만 21세기에는 MIT기술이 꽃을 피울 것이라는 낙관론도 머리를 들고 있다.

응용물리학 분야의 유력지 'New Journal of Physics'와 'Applied Physics Letter'도 김 박사팀의 이 같은 연구 성과를 인정, 연구논문을 게재하기도 했다.

김 박사팀의 이번 성과는 특히 현재의 실리콘 반도체 기술의 한계를 초월한다는 점에서 관심을 끌고 있다. 실리콘의 경우 반도체 집적도가 높아져 내부 회로의 선폭이 좁아지면 낮은 전압으로 인해 신호를 실어 나르는 전자의 흐름이 통제되지 않는 맹점을 갖고 있다.

나노시대가 본격 개막되려면 반도체는 지금보다 훨씬 작아져야 하지만 전류가 흐르지 않아 기술적 한계에 직면할 수밖에 없는 상태다. 반도체 소자의 크기가 감소하면 전류량도 줄어들어 어느 한계 이상의 크기 이하에서는 반도체 소자가 동작을 중단하는 이른바 '사이즈효과' 때문이다. 따

라서 전류가 금속처럼 잘 흐르면
서도 반도체 트랜지스터의 크기를
대폭 줄여줄 수 있는 새로운
물질을 이론과 실험으로 완성해
야 한다는 과제가 물리학계의 새
로운 화두로 등장했다. 김 박사팀
의 이번 연구성과는 바로 이런 한
계를 극복했다는 점에서 높은 평
가를 받고 있다.

실제로 반도체 소자의 경우 40
nm까지 줄일 수 있다는게 삼성전
자 등 관련업계의 전망이지만 김
박사가 규명한 이번 기술을 활용
할 경우 4nm까지 축소할 수 있다.
실리콘 대신 MIT 현상을 일으키는
모트 금속을 트랜지스터의 재
료로 사용하면 곧바로 이를 실현
할 수 있기 때문이다.

이에 대해 일본의 유명 물리학
자인 아스모토 다나가 쓰쿠바첨
단과학기술연구소(AIST) 박사는
“한국에서도 노벨물리학상을 수

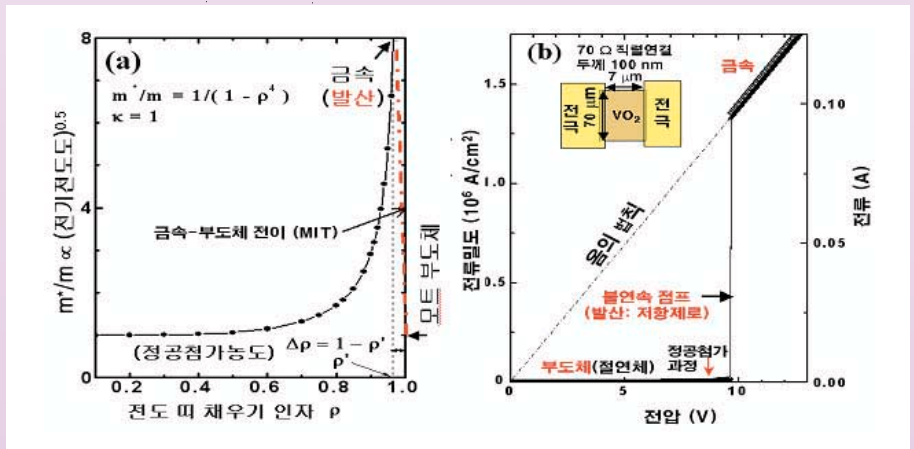
상할 수 있는 뛰어난 후보자 1명을 보유하고 됐다”며 큰 의
미를 부여했다. 미국 캘리포니아 샌디에이고 대학 디미트리
리 바소브 교수는 “김 박사과 ETRI 연구팀이 얻은 이번 성
과는 전형적인 모트-절연체인 바나듐옥사이드에서 일어나
는 복잡한 효과를 이해하는데 크게 기여했다”고 평가했다.

민병일 포항공대 교수는 “모트 교수가 50여 년 전 반도체
에 외부 환경을 바꿀 경우 전기가 흐른다는 이론을 내놓은
이래 이를 실험으로 보인 사례가 거의 없었다”며 “실제 실험
장비를 이용해 이 이론을 입증했다는 점에서 그 의의가 있
다”고 설명했다. 민 교수는 “향후 김 박사가 적용할 실험환
경 외에 다른 환경에서도 모트의 전이 현상이 일어나는지를
밝혀내고 추가 연구를 진행할 경우 실제 모트현상을 이
용한 신소자인 ‘모트 트랜지스터’의 상용화도 얼마든지 가
능할 것”이라고 말했다.

하지만 신중한 평가도 적지 않다. 독창적인 연구성과로

MIT 기술의 응용분야

MIT 전자소자	광소자	메모리 소자	RF 소자	Display 및 기타 소자
<ul style="list-style-type: none"> • 전지보호용 소자 • 온도센서 • 스위칭 소자 • 분자소자 • PIN 다이오드 • 나노소자 	<ul style="list-style-type: none"> • MIT밀리미터파/광파용 게이트 • MIT 광홀로그래(테라급메모리) • MIT 광검출기 • MIT 레이저(광원) • 2색 지시계 	<ul style="list-style-type: none"> • MRAM • PRAM • ReRAM 	<ul style="list-style-type: none"> • RF MIT 스위치 • RF MIT 발전기 • RF 신개념 MMIC • 신기능 RFID 	<ul style="list-style-type: none"> • THz소자 • MIT FED • 바라스터 • 초고전압 접음 검출 소자 • 적외선 검출기 • 초고속입자 검출기



불연속 금속-절연체 전이현상의 실험관측 자료

보기에는 다소 무리가 있고, 상용화에도 상당한 시간이 필요하다는 주장이다. 최한용 성균관대 교수는 “모트 교수의 가설을 실험으로 입증한 성과만으로 노벨상 수상 가능성을 점치는 것은 너무 성급하다”며 “이번 연구가 고출력, 초소형의 신소자 개발로 어떻게 이어지는가가 평가의 관건이 될 것”이라고 말했다. 김철구 연세대 교수도 “모트의 가설에 대해서는 사실 굉장히 많은 연구가 지금도 진행중이기 때문에 이번 연구 결과가 결정적으로 독창적이라고 단정하기는 힘든 상황”이라며 “노벨상 수상 가능성 등은 좀 더 신중히 지켜봐야 할 것”이라고 말했다.

나노소자 개발 응용, 경제적 효과 매우 커

김 박사가 증명한 ‘금속-절연체 전이 가설’은 반도체 이후 나노 소자 개발 등에 응용, 다각도로 상용화될 것으로 기대된다. ETRI는 이번 연구성과가 차세대 디스플레이,



실험실 모습

차세대 비휘발성 메모리, 광소자, 열감지 센서 등 광범위한 분야에 응용할 수 있을 것으로 보고 있다. 또 전기·전자 기기의 잡음 제거 소자 등에도 영향을 미쳐 경제적인 측면에서 전문학적인 효과를 기대할 수 있을 것이라는 게 ETRI 측의 설명이다. 특히 열감지 센서의 경우 이미 시제품을 개발해 당장이라도 양산체제 돌입이 가능한 상태다.

김 박사팀은 이번 기술이 활용될 경우 휴대전화 단말기와 PC, 디지털TV 등의 첨단 전자제품을 더욱 소형화할 수 있고, 나아가 전력소비도 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다고 밝혔다. 이와 함께 미사일 추적 장치와 군용 열상장비, 적외선 카메라 등에도 응용이 가능하다는 관측도 나온다.

김 박사는 “모트 절연체의 경우 디지털 전자제품의 성능과 크기를 크게 개선시킬 수 있을 것”이라며 “앞으로 21세기 최대 화두인 나노기술과 결합된 전자소자와 메모리, 전지, 광산업, 센서산업, 통신산업 등에도 크게 기여할 수 있

을 것”이라고 큰 기대를 나타냈다.

하지만 새로운 응용분야가 지속적으로 발굴될 가능성이 있어 실제 경제적 효과는 예상을 훨씬 뛰어넘을 수 있다는 낙관론도 제기되고 있다. 이 때문에 ETRI는 이번 연구결과를 차세대 성장동력원으로 지목하면서 정부 차원의 지원을 호소하고 있다.

ETRI는 MIT 원천기술 및 응용소자는 세계적으로 원천 기초기술인 만큼 국제표준화 논의는 아직 없는 상태라면서 그러나 세계시장 선점을 위해서는 국가적인 표준화 선도 작업이 필요하다고 강조했다. ETRI 관계자는 ‘금속-절연체 전이이론’ 규명에 따라 국내·외에 16건의 핵심 원천특허를 출원, 이 중 3개가 등록됐다면서 연구개발의 지속적인 추진을 위해 적극적인 지원과 연구 환경이 뒷받침될 경우 우리 나라의 강력한 차세대 성장동력이 될 것이라고 전망했다. **ST**