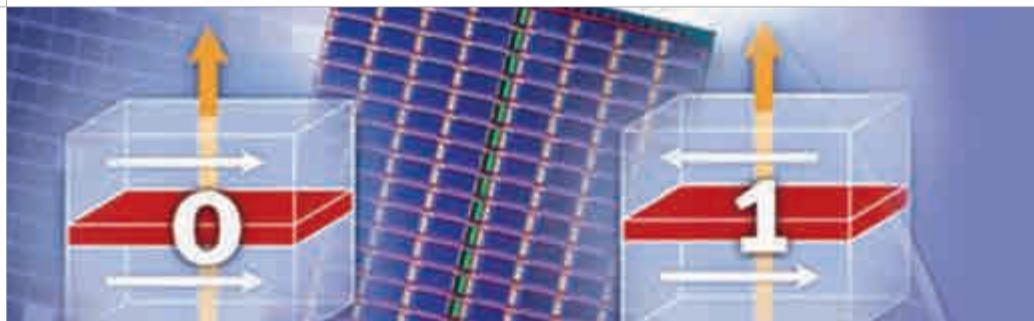


융합연구리뷰

Convergence Research Review



양자역학 전자소재 구현에 활용되다

스핀트로닉스

-

미래의 블루오션

극한환경 기술 전쟁

목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2016 September vol.2 no.9

03 편집자주

양자역학 전자소재 구현에 활용되다 스피트로닉스

04 (리뷰) 스피트로닉스 : 전자소자를 넘어 스피노자로

37 국가 R&D 현황분석-스피트로닉스

미래의 블루오션 극한환경 기술전쟁

41 (리뷰) 극한환경의 이해와 극복을 위한 융합연구 추진방향

57 국가 R&D 현황분석-극한환경 기술



발행일 2016년 9월 12일

발행인 하성도

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

편집 (주)디자인플럼 tel. 051-202-9201



양자역학 전자소재 구현에 활용되다 스핀트로닉스

20세기 들어와 소개된 양자역학은 그 당시까지 완벽하다고 믿어오던 고전역학을 뒤엎으며 세상을 변화시켜 왔다. 그리고 21세기에 이르는 현재 양자역학은 또 한번 세상의 급격한 변화를 가져오려 하고 있다. 전하의 성질을 바탕으로 개발된 기존의 전자소재는 20세기 후반부터 지속적인 R&D를 통해 소형화, 저전력화, 고성능화를 이루었으나, 현재는 그 원리의 물리적 한계에 부딪혀 더 이상의 발전이 어려운 상황이다. 이에 기존의 전자소재의 물리적 한계를 뛰어넘는 새로운 소형, 저전력, 고성능 전자소재의 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중 대표적으로 제시되고 있는 방식이 바로 스핀트로닉스 기반 전자소재이다. 전하의 전하 성질만을 이용하는 것이 아닌 전하의 양자역학적 특성인 회전 특성까지 이용하는 스핀트로닉스 기술은 일찌감치 양자역학의 등장과 함께 그 개념은 제안되었으나, 실질적인 구현은 자기장의 조절의 어려움으로 인하여 20세기 후반에 들어서야 가능하게 되었다. 하지만 21세기 초 급속한 나노기술의 발전과 함께 자기장의 조절이 수월해지면서 급속도로 실용화 가능성이 높아지고 있다

이에 이번 호의 1부에서는 현재 전자소재의 물리적 한계를 양자역학이라는 기초과학과 나노기술이라는 융합 기술의 만남을 통해 극복하고자 하는 스핀트로닉스의 개념 및 연구 동향, 향후 연구 방향을 소개함으로써, 기초물리와 전자소재의 활발한 융합연구를 통해 향후 전자소재 분야에서도 우리나라가 전세계 산업시장의 주도권을 잡아갈 수 있기를 기대해 본다.

미래의 블루오션 극한환경 기술 전쟁

우주, 심해, 극지 등의 극한 환경은 아직 인류의 본격적인 발걸음이 닿지 않은 미지의 개척 영역으로 아직 남아 있다. 20세기 들어 이 미지의 영역에 접근하기 위해 인간은 다양한 노력을 수행하여 왔으나, 아직 그 수준은 미미한 상황이다. 고온, 저온, 고압, 저압, 진공, 고전기기장 등과 같은 극한 환경에서는 우리가 일상적으로 활용하던 장비가 동작을 하지 않을 가능성이 있기 때문에 선진국을 중심으로 이러한 극한환경의 미지 영역 탐사, 개발을 위한 기술개발은 활발히 이루어지고 있다. 이로 인해 미래의 블루오션이라 할 수 있는 환경에서의 선진국과 후발국간의 기술 격차는 점차 확대되고 있으며, 이는 50년 뒤 국가 경쟁력을 가늠하는 중대한 기술이 될 것이라 많은 이들이 예견하고 있다.

이에 이번 호의 2부에서는 다양한 학문의 융합을 바탕으로 극한 환경에서의 인간의 생존 또는 기기의 활동을 위해 필요한 기술이라 총칭할 수 있는 극한 환경 기술의 연구 동향 및 연구 방향, 향후 활용 분야 등에 알아봄으로써, 융합연구를 바탕으로 과거 우주과학기술이 그랬던 것처럼 다양한 분야에 파급효과를 끼칠 것이라 생각되는 극한환경기술분야에서 기술적 선점을 위한 아이디어들이 활발히 나와 미래 우리나라의 핵심 산업기술로 성장해 나가기를 기대해 본다.

스핀트로닉스: 전자소자를 넘어 스핀소자로

▣ 한국과학기술연구원 차세대반도체연구소 **우성훈** 박사(shwoo_@kist.re.kr)

서론

‘모든 물질은 원자로 이루어져 있고, 각각의 원자는 전기적·자기적 성질을 띤다.’ 우리 모두가 어릴적 과학시간에 쉽게 접하는 내용이다. 이 문장에서 전기적 성질의 기초가 되는 것이 원자를 구성하는 전자의 ‘전하’이며, 전자가 회전하는 방향을 일컫는 ‘스핀’에 따라 각각의 원자는 다른 자기적 성질을 갖는다. 하지만 대부분의 사람들에게 ‘전하’라는 말은 친숙하지만 ‘스핀’이라는 용어는 아직까지 쉽게 이해되지 않는다. 이는 아마도 현대사회에 전하를 기본으로 한 전기-전자 소자가 이루어낸 많은 결과물들과 무관하지 않을 것이다. 특히 지난 반세기동안, 반도체 기반의 전자소자는 급속한 기술적 진보를 통해 오늘날의 정보화 시대를 주도해 오고 있다. 하지만 최근 반도체 기반 전자소자 기술은 물리적 현상 및 제조 공정에 있어 근본적인 한계에 접근하고 있다. 이에 반하여, 더욱 빠른 속도로 팽창하고 발전해 나가는 현대 사회의 모습을 볼 때, 이러한 한계를 극복하고 현재 기술을 더욱 발전시킬 수 있는 새로운 차세대 전자소자 기술의 출현이 강하게 요구되고 있는 상황이다.

전자소자가 한계에 다다름에 따라 가장 크게 주목받는 미래기술 중 하나가 ‘스핀’을 기반으로 한 스핀트로닉스(Spintronics) 기술이다. 기존의 전자소자 기술인 일렉트로닉스(Electronics)는 전자의 두 가지 특성인 전하와 스핀 중에서 양자역학적인 스핀을 고려하지 않고 전하만을 제어하는 데 반해, 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 기술로서 이 기술을 이용한 스핀전자 소자의 개발을 통해 기존 전자소자의 기술적 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망되고 있기 때문이다. 특히, 스핀전자 소자는 스핀의 고유특성인 비휘발성(Non-volatility) 뿐만 아니라 초고속, 초저전력 및 초고주파 등의 특성을 가지고 있기 때문에 차세대 전자소자로서의 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 특히 최근 급속도로 발전한 나노테크놀로지(NT)와의 융합을 통해, 스핀소자를 실생활에서 접할 기회도 멀지 않았다. 이에 본 융합연구리뷰에서는 현대 사회가 접한 전자소자의 문제점을 시작으로, 스핀트로닉스의 필요성, 원리, 현재 연구 동향 및 앞으로 스핀트로닉스가 나아가야 할 방향에 대해서 살펴보고자 한다.

무너진 무어의 법칙(Moore's Law)! 새로운 전자소자의 시대

그동안 전세계 전자소자관련 산업은, 1970년대 이후 40여년동안 '무어의 법칙'을 따라 발전해 왔다. 인텔의 공동 창업자인 고든 무어(Golden Moore)는 마이크로칩에 저장할 수 있는 데이터의 양이 약 1년 6개월마다 2배씩 증가한다고 예측했고, 놀랍게도 실제로 지난 40여년동안 반도체 업계에서는 무어의 법칙을 따라 마이크로칩의 소자 집적도가 향상되어 왔다. 즉, 한정된 공간에 더 많은 전자소자를 만들 수 있게 됨으로서 크기는 더 작지만 훨씬 큰 용량을 가지고 빠르게 작동하는 제품들을 생산해낼 수 있게 되었다. 이러한 기술의 향상 아래 현대 사회의 우리는 스마트폰, 태블릿 PC 등의 매우 유용한 상품들을 사용할 수 있게 되었다[그림 1].

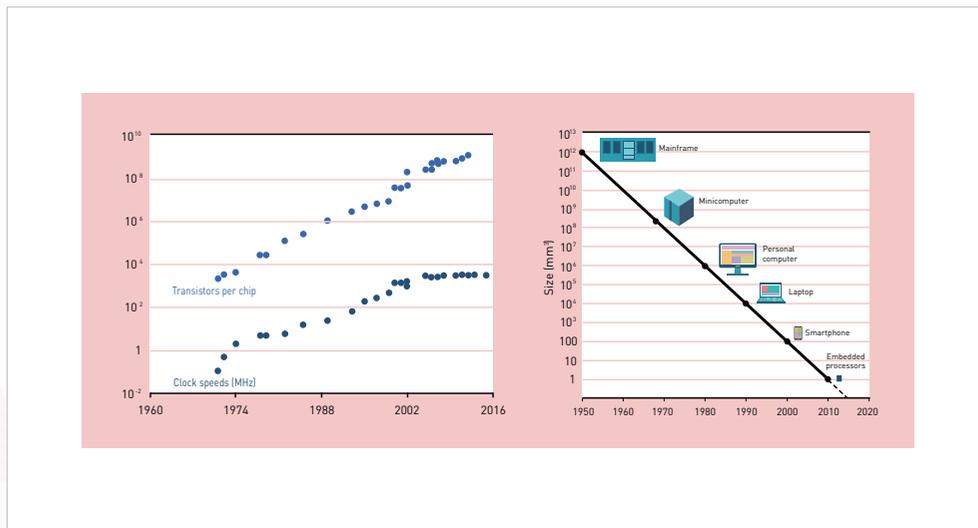


그림 1. 1970년부터 2016년까지 무어의 법칙을 따라 향상된 마이크로칩 소자의 집적도(Transistors per chip) 및 속도(Clock Speeds) (좌). 소자의 집적도와 속도 향상에 따라 변화된 실제 전자기기의 크기 (우)

하지만 지난 40년간 불문불처럼 지켜져온 무어의 법칙이, 오는 2020년을 전후로는 물리적인 한계에 다다르게 되어 그 명을 다할 것으로 보인다. 2016년 현재, 우리가 사용하는 메모리 소자의 대표격이자 전자소자기술의 최고봉에 있는 DRAM(Dynamic Random Access Memory)의 경우에는 15nm 공정을 통해 생산되고 있다. 간단히 말해, 우리가 사용하는 메모리 소자의 가장 기본단위가 15nm의 길이를 가지는 것이다. 현재의 기술력 및 예측에 따르면, 2020년에는 최소 2-3nm(원자 10개 크기) 정도의 공정까지 도달할 수 있을 것으로 예상되지만, 소자의 크기가 더 작아질 경우에는 불확실한 양자 현상의 개입 등으로 인하여 기존 메모리 소자와 같은 동작이 불가능해지게 된다.

이러한 전자소자의 현실이 무색하게, 최근들어 전 세계적으로 개인용 모바일 전자기기 등을 비롯한 각종 정보제품들이 빠른 속도로 초소형화, 고속화, 지능화의 방향으로 진화하고 있으며, 유비쿼터스, 홈네트워킹, 모바일 컴퓨팅 등 새로운 기술의 발전과 더불어 더욱 고집적화된 소자의 수요가 급속히 증대되고 있다. 하지만 앞서 언급한 것과 같이, 현재의 기술 개발 추세가 지속된다면 2020년경 현재의 전자소자는 기술적 한계에 다다를 것으로 예상되고 있어 새로운 대체기술을 찾는 것이 시급한 상황이다[그림 2].

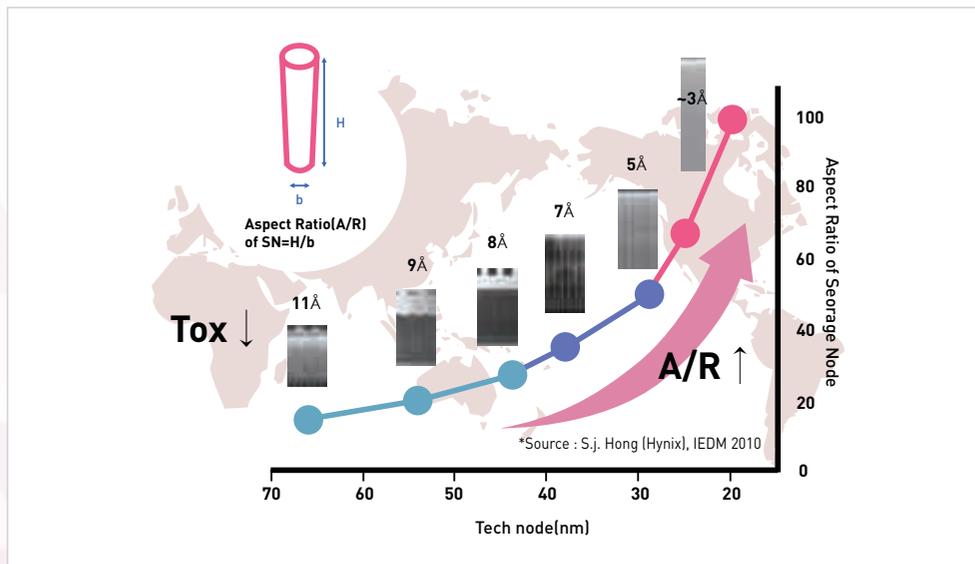


그림 2. 전자소자의 기본 단위인 트랜지스터의 크기 (Tech node)와 단위 소자당 저장할 수 있는 용량의 상관관계

더 차갑게, 더 빠르게: What's Next?

그렇다면 현재 전자소자 관련산업이 직면하고 있는 문제는 소자를 더 작게 만들기 위한 집적도 뿐일까? 정답은 No! 이다. 물론 소자 집적도의 향상이 지난 40여년동안 메모리 산업을 부흥시킨 가장 큰 원동력이었지만, 훨씬 복잡해진 현대 사회의 모든 수요를 충족시키기 위해서는 집적도 이외에도 극복해야할 큰 요소들이 존재한다.

가장 시급한 현안 중 하나는 ‘발열’ 문제이다. 소자의 고집적화는 단위소자에서의 전력소모 증가를 야기하였고, 이로 인한 급격한 온도 상승이라는 문제를 동반해 왔다. 즉 전자소자의 온도 자체를 적정 온도로 유지시키기 위해서 소자의 냉각에 추가로 전력을 소모하는 일이 발생하였고, 이는 단위 소자 당 에너지 소모를 기하급수적으로 늘리게 되었다. 뿐만 아니라, 전자소자가 실제 동작하지 않을 때에도 소모되는 ‘정지 전력(static power)’ 문제 또한 중요한 이슈로 대두되고 있는 상황이다. 특히 현재 활발히 연구중이며, 2020년경 실제 상용화될 것으로 예상되는 양자 기반 슈퍼컴퓨터의 경우 전력소모가 200MW에 달하게 되며, 이때 메모리 소자에서 발생하는 온도가 태양 표면온도인 6000 K에 도달하여 칩이 탈수있는 상황이 벌어질 것이라고 예측되기도 한다[그림 3]^{3,4}.

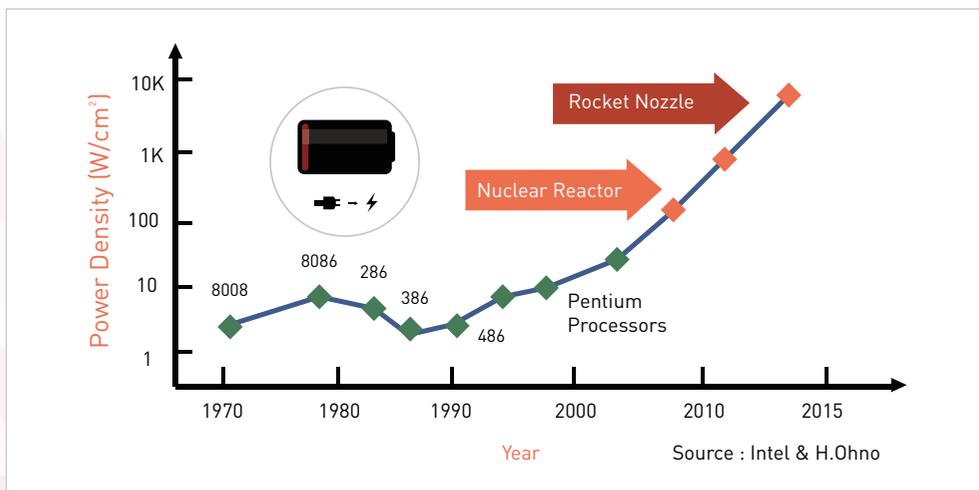


그림 3. 전자소자의 고집적화에 따라 증가하는 단위 소자당 발열량

단순히 모바일 기기 및 개인용 컴퓨터 등을 넘어, 구글과 같은 글로벌 검색엔진과 각종 포털 사이트, 블로그, 페이스북, 트위터 등의 소셜 네트워크의 광범위한 이용으로 IT 산업 서버 및 인터넷 데이터 센터(IDC)에 소모되는 전력 수요를 폭발적으로 증가하고 있다. 한 예로 IT산업의 핵심장치인 서버의 경우, 가로 60 cm 세로 2.5 cm에 불과한 서버 한 대가 소모하는 전력량이 한 달에 360kWh 정도로 대략 30평형 아파트 한 채에서 소비하는 전력량(220kWh) 보다 많으며, 40만대의 서버를 관리하는 IDC가 소모하는 전력 소비량은 인구 20만 도시의 총 전력 소비량(가정, 산업, 공공 모두 포함)과 비슷한 정도이다. 미국의 경우 IDC가 76,400,000MWh(2011년 기준)의 전력을 소모했으며, 제네바와 취리히에 있는 IDC 및 전산센터 등이 소모한 전력이 이 지역 전체 전력의 10%에 해당한다는 보고가 있다^{5,6}. 이러한 발열문제 해결을 위해, 한 예로 2016년 2월 마이크로소프트 연구소는 ‘네이틱(Natick)’이라는 코드명으로 수중 데이터센터 설비 및 가동 실험을 진행하기도 하였다^{7,8}. 즉 모바일 정보기기 및 데이터 네트워크의 전력소모 문제가 이제는 가장 큰 사회적 현안 중 하나가 되어버린 것이다[그림 4].



그림 4. 2016년 마이크로소프트 연구소가 설치 및 시험 운행중인 수중 데이터센터 모습

향후에는 빅 데이터, 소셜 네트워크, 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅 등 유비쿼터스 모바일 컴퓨팅이 더욱 활발해질 것으로 전망됨에 따라 처리해야 하는 정보량은 기하급수적으로 증가할 것으로 예상되며, 이에 사용되는 모바일 기기 등 각종 정보제품들은 초소형화, 초저전력화, 초고속화 및 지능화의 방향으로 빠르게 진화해야 될 것이다. 따라서 이러한 기술동향에 대응할 수 있는 새로운 개념의 소자의 개발이 매우 필요한 상황이다.

왜 스핀트로닉스인가?

반도체소자의 집적도 및 전력소모 문제를 극복하고, 더 나아가 향후 새로운 산업을 이끌어 갈 원동력으로서 큰 힘을 발휘하기 위해서는 소자 작동의 물리적 원리가 근본적으로 변해야 한다. 이를 위하여 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 현재로서는 ‘멤리스터 (Memristor = Memory + resistor)’, ‘양자 메모리’ 및 ‘스핀트로닉스’가 가장 큰 각광을 받고 있다.

가장 먼저 ‘멤리스터’ 기술은, 기존의 반도체 단위 셀이 ‘0’(전압 Off) 또는 ‘1’(전압 On)의 두가지 상태만을 표현할 수 있었던 것과는 달리, 특정 물질 내에서는 외부에서 가하는 전압 및 자기장의 크기에 따라 두가지 이상의 다양한 준안정된 상태(meta-stable state)를 보인다는 사실을 이용한 것이다. 따라서 이러한 물질을 사용하여 기존 메모리 셀을 대체하게 된다면, 같은 부피 안에 0과 1의 두가지 신호가 아닌 여러가지 신호를 제어할 수 있게 되고(예. 0, 0.2, 0.4 ... 1), 이는 궁극적으로 현재의 나노소자 기술로도 집적도 문제를 수백~수십배 이상 극복하는 방법을 제공하게 되는 것이다. 현재 이러한 멤리스터 분야에서는 TiO_2 와 같은 절연체 내에서 이동하는 이온들의 이동 범위를 조정하여 다양한 저항 상태를 이용하는 기술 등이 활발하게 연구되고 있다. 하지만 한 물질내의 여러가지 준안정 상태를 자유롭게 변화시키는 기술 및 해당 물질의 내구성 문제 등으로 인하여 실제 실용화에는 10년 이상이 걸릴 것으로 예상된다.

두번째로 ‘양자 메모리’ 기술은 양자컴퓨터와 같이 양자의 ‘중첩(superposition)’ 및 ‘얽힘(entanglement)’을 이용한 기술이다. 두 가지 이상의 양자 상태의 물질이 가까워져 물질들 사이에 양자 상호작용이 활발하게 일어나면, 에너지적으로 안정된 양자 상태의 가짓수가 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이를 계산(computing)에 활용하면, 수많은 경우의 수를 매우 짧은 시간에 계산할 수 있다. 이러한 이유로 양자 컴퓨터 기술은 최근 큰 관심을 받아왔다. 이와 마찬가지로, 메모리 또는 기존 전자소자 대체를 위해 같은 기술을 적용하게 된다면, 매우 작은 공간을 차지하는 양자 상태들로 현재의 집적도, 고열량 등 많은 문제들을 한번에 해결할 수 있다. 하지만 이러한 양자 기술은 양자물질 제어기술, 중첩 및 얽힘 제어

기술, 상온 활용 기술 등 아직 실용화를 위해서 많은 난관을 앞두고 있기에, 지금의 전자소자문제를 당장 해결하기에는 큰 무리가 있는 것이 현실이다.

따라서, 지금의 전자소자를 빠른 시일내에 효율적인 방법으로 대체하기 위하여 가장 각광 받고있는 차세대 반도체 기술은 전자의 ‘스핀’을 이용한 ‘스핀트로닉스’이다. 기존 반도체 소자는 기본적으로 전자의 ‘전하’를 이용하여 실리콘기반의 CMOS(Complementary Metal-Oxide)소자 형태로 동작하지만, 스핀트로닉스 소자는 자성체 기반의 소자를 활용하여 전자의 ‘스핀’을 이용하여 작동한다. 아래 [그림 5]에서는 현재 기술의 현황(빨간색 테두리)과 기술의 한계를 극복하기 위해 필요한 유망한 신기술들을 보여주고 있다. 소자 구조, 재료, 회로 등 다양한 분야에서 새로운 기술개발을 위해 노력하고 있는 상황 속에서, 스핀 관련 기술(파란색 테두리)이 모든 분야에 걸쳐 주목을 받고 있음을 알 수 있다⁹. 다시 말해 다양한 분야의 융합을 통해 하나의 완전한 스핀소자 기술을 완성을 위해 다학제적인 연구가 수행되고 있는 것이다.

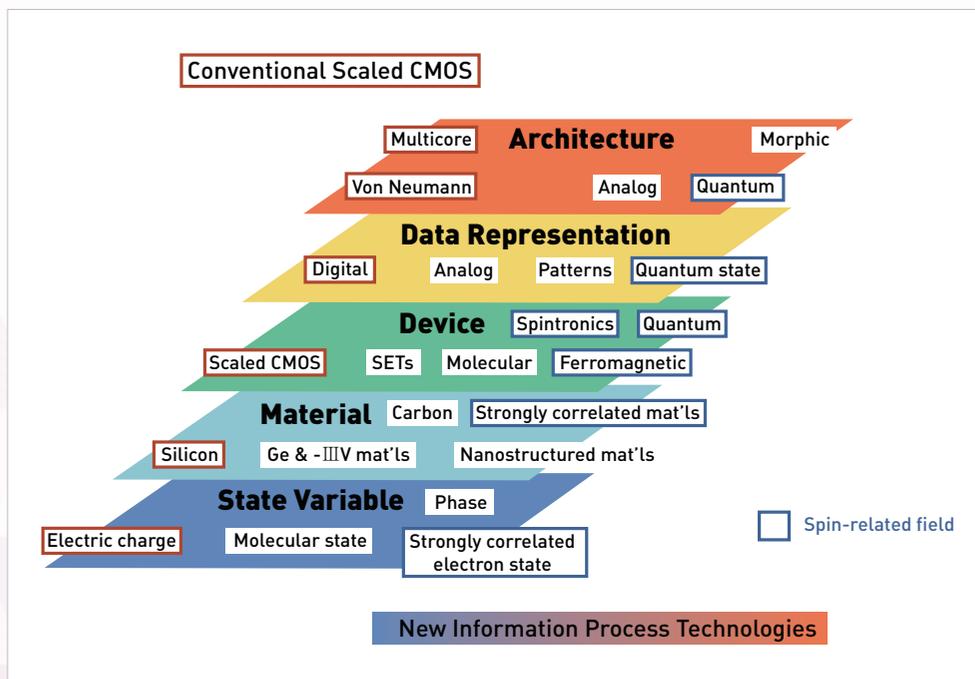


그림 5. 전자소자의 한계를 극복하기 위한 미래 유망 기술

그렇다면 왜 스핀트로닉스 소자인가? 앞서 서론에서 언급하였듯이, 전자의 스핀에 기반한 소자는 스핀의 고유특성인 비휘발성을 가지고 있다. 즉 전자소자의 경우에는 외부 전력이 존재할때만 가동 가능하지만, 스핀트로닉스 소자는 외부 전력 공급이 끊어지더라도 여전히 정보를 가지고 있을 수 있다. 이로 인해 스핀트로닉스 소자는 DRAM을 대체할 초저전력 메모리 소자로서 가장 큰 각광을 받고 있다. 뿐만 아니라, 스핀트로닉스 소자들은 종래의 전자소자보다 훨씬 더 작은 전자들로 데이터를 나타낼 수 있으므로, 새로운 물리적인 방법을 통해 전자소자가 직면한 직접화의 문제를 근본적으로 극복할 수 있다. 이러한 초저전력 및 고직접화가 가능한 스핀트로닉스 소자를 현재 전자소자와 같이 양산 가능하다면, 우리가 현재 직면한 직접화, 발열, 속도한계 등의 문제를 뛰어넘는 새로운 형태의 소자가 산업 전 분야에 걸쳐 큰 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

성공적인 스핀트로닉스 소자의 발전을 위해서는 새로운 현상 및 기초원리 규명부터 이를 응용한 새로운 소재/소자의 설계 및 제조, 새로운 특성 분석 및 표준 확립 등 기초에서 응용에 이르기까지 매우 광범위한 연구가 필요하다. 따라서 성공적인 스핀트로닉스의 발전을 위해서는 다학제적 연구 및 융합연구가 반드시 필요하며 실제로 전 세계적으로도 융합연구를 통해 해당 문제 해결을 위해 노력하고 있다.

스핀트로닉스 관련 국내외 시장 동향

스핀트로닉스의 범주에 포함되는 상세 기술 및 연구 동향을 알아보기에 앞서, 스핀트로닉스 관련 국내외 시장 동향에 대해 살펴봄으로써, 현재 반도체 시장에서 스핀트로닉스의 중요성에 대해 알아보려고 한다. 2016년 현재 전체 반도체 시장 규모는 365조원이며, 2021년 460조원으로 성장이 예상된다¹⁰. 그리고 스핀트로닉스 기반 메모리 및 스핀전자소자에 대한 연구는, 궁극적으로 전체 반도체 시장의 대부분을 차지하는 DRAM, SRAM 및 플래쉬 메모리 시장 대체에 우선적으로 초점을 맞추고 있다. 또한 장기적으로는 긴 수명과 높은 내구성을 바탕으로 자동차 등 극한 환경용, 저전력소모 특성을 바탕으로 모바일 기기용으로 활용 가능할 것으로 기대되어 반도체 시장을 넘는 새로운 시장 개척에 대한 전망도 밝은 상황이다.

Gartner사의 보고에 따르면, 2012년 기준으로 총 반도체 시장의 규모는 308조원으로 추정되었으며, 이후 연평균 성장률은 4.9%로 예측되었다¹¹(이러한 성장률에 근거한 현재 시장 규모는 실제 2016년 시장 규모¹⁰와 비슷한 값을 보인다.) 따라서, 2016년 현재 스핀트로닉스와 관련된 메모리 및 시스템 분야의 전체 시장은 전체 약 40조원에 달하는 거대 시장임을 알 수 있다[표1].

표 1. 메모리 및 시스템 반도체 시장 규모 (단위: 억원, 환율 1,000원/달러 적용, Gartner (2012,10)¹¹)

		2012	2013	2015	2016	2019	2022	2025
세계 (국내 포함)	메모리	589,000	668,000	706,000	798,000	811,000	825,000	838,000
	시스템	1,664,000	1,749,000	1,939,000	2,021,000	2,047,000	2,073,000	2,100,000
국내	메모리	315,000	357,000	378,000	427,000	434,000	441,000	449,000
	시스템	13,600	14,300	15,900	16,500	16,800	17,000	17,200

이 때, 국내기업(삼성전자, 하이닉스)의 메모리 반도체 시장 점유율 50%를 감안하여 계산하게 되면, 국내 시장 규모는 2016년 현재 약 20조원 정도로 추정할 수 있다. 메모리 관련 사업을 직접 진행하는 삼성전자, SK하이닉스 등 외에도, 공정장비 개발 회사, 원재료 공급업체 등으로의 산업적 파급효과까지 고려한다면, 이미 스핀트로닉스 관련 분야가 국내 시장에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

스핀트로닉스의 원리와 역사

스핀트로닉스의 어원은 전자의 자기적인 회전 또는 방향을 의미하는 ‘스핀’(Spin)과 ‘전자 기술’(Electronics)의 합성어이다. 1960년대 무어의 법칙 이후로 전자를 기반으로 한 전자 기술은 매우 발전하였지만, 전자의 스핀을 활용한 기술은 1990년 이후 등장하여, ‘스핀트로닉스’라는 용어 또한 비교적 최근인 1990년대 이후로 불리기 시작하였다. 불과 20여년이 조금 넘는 시간만에 스핀트로닉스가 매우 빠른 속도로 발전할 수 있었던 이유는, 스핀트로닉스라는 용어가 나오기 이전부터 매우 활발하게 진행되었던 ‘스핀’에 대한 기초연구 덕분이다. 따라서 현대의 스핀트로닉스를 알아보기에 앞서, 이를 이해하는데 기본이 되는 스핀의 정의 및 중요한 과학적 원리에 대해 알아보려고 한다.

기초 물리에 대한 매우 중요한 연구결과들이 쏟아져 나온 1900년대 초반으로 돌아가 보자. 1890년 Rydberg가 빛의 선스펙트럼의 규칙성을 밝히고, 1913년 Bohr가 수소원자 이론을 발견하여 원자의 스펙트럼선에 대한 여러 가지 물리적 사실들이 알려졌으나, 당시의 물리적 지식으로 해결되지 않는 문제가 두 가지 있었다. 하나는 알칼리(Alkali) 원소의 스펙트럼 항이 2중 구조를 가지는 일이었다고, 다른 하나는 원소의 스펙트럼이 자기장에 의하여 분리되는 제만 효과(Zeeman's Effect)가 생긴다는 것이었다. 즉, 당시의 물리학자들은 전자 내부에 자기적인 성질을 띠는 무언가가 있고, 이는 두가지 종류를 가지고 있다는 가설에 도달할 수 있었다. 이에 대한 명확한 설명은 1925년에야 비로소 Uhlenbeck와 Groutsmith에 의해 밝혀졌다. 두 사람의 실험에 의하면, 전자는 하나의 입자일 뿐만 아니라, 스스로 자전하여 일정한 각운동량을 가지는 것으로 해석되었다. 두 사람의 실험에서 발견된 전자의 자전이 현대 물리에서 말하는 스핀이다. [그림 6]에서 보이는 것과 같이 스핀은 전자의 자전 방향에 따라 두가지 경우의 수를 가질 수 있으며, 또한 자전 방향에 따라서 주변 자기장의 N극과 S극이 바뀌게 된다.

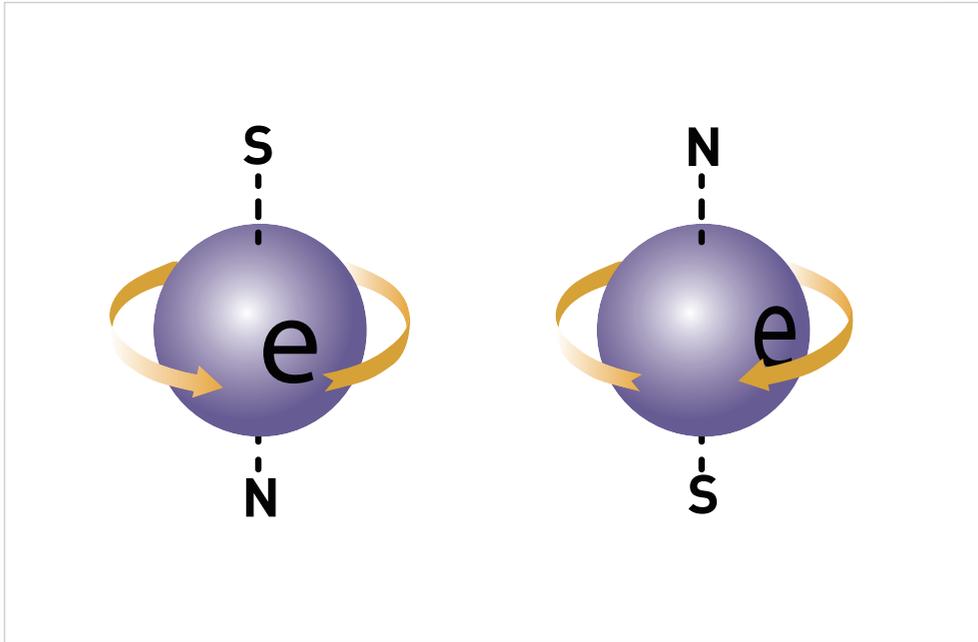


그림 6. 전자의 자전 방향에 따른 스핀의 두가지 경우

우리 주변의 대부분의 물질에서, 외부 자기장이 존재하지 않는 경우 전자들은 두 스핀 상태인 업 스핀(\uparrow)과 다운 스핀(\downarrow)을 동일한 확률로 가지게 된다. 이 때, 강한 외부 자기를 가하면 스핀의 방향이 한쪽 방향으로만 정렬시킬 수 있으며, 이렇게 한쪽 방향으로 정렬된 전자 스핀을 가리켜, ‘스핀 분극’을 지녔다고 말한다. 통상의 금속은 외부 자기장이 존재하지 않는 경우 스핀 분극 현상이 발생하지 않는다. 즉 업 스핀과 다운 스핀의 전자수가 같다. 하지만 Fe, Co, Ni과 같은 강자성 금속의 경우에는 금속 내부에 존재하는 매우 강한 교환상호작용으로 인하여 자연 상태에서 스핀 분극 현상이 일어나기도 하는데 이러한 물질들이 우리 생활에서의 ‘자석’을 이루는 기본 물질들로 사용되고 있다.

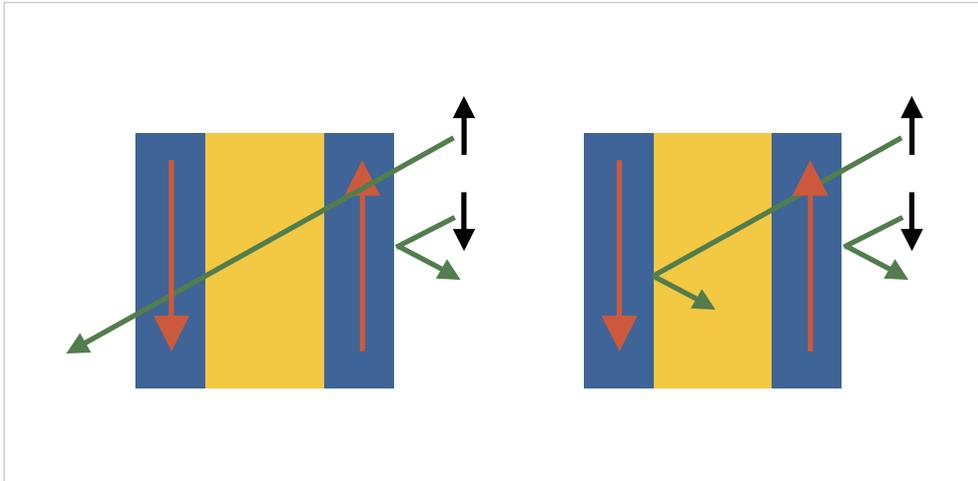


그림 7. 거대자기저항현상의 모식도

자기저항 현상

그렇다면 지금부터, 고전적인 ‘스핀’에 대한 연구를 현대 기술과 접목시킬 수 있는 ‘스핀트로닉스’가 되게끔 만들어준 가장 큰 기술적 발전인 ‘자기저항현상’에 대해 알아보자. 일반적으로, 스핀 분극 전류(한 종류의 스핀만으로 구성된 전자가 흐르는 전류)를 발생시키는 가장 간단한 방법은 강자성 금속에 전기를 흘려 전류를 사출하는 것이다. 이 효과의 가장 큰 응용 분야는 1988년 프랑스 과학자 Albert Fert에 의해 발견되어 2007년 노벨 물리학상을 받은 거대 자기저항(GMR : Giant Magneto Resistive effect) 소자이다².

[그림 7]에서 볼 수 있듯이, 일반적인 거대 자기저항 소자는 하나의 스페이서 층(Spacer, 노란색)으로 분리된 두개의 강자성 물질(파란색)로 구성되어 있다. 그림에서 왼쪽의 경우에는, 두가지 강자성 물질이 동일한 방향으로 스핀이 정렬되어 있고, 이러한 구조에 업-다운-스핀을 동일한 확률로 가진 전류를 흘리게 되면 업-스핀의 경우에는 쉽게 통과하지만 다운-스핀의 경우에는 통과하지 못한다. 반면에 오른쪽 그림과 같이 두가지 강자성체가 반대 방향으로 정렬되어 있을 경우에는, 업-다운-스핀 모두 쉽게 통과할 수 없다. 따라서 왼쪽 경우가 훨씬 낮은 저항을 보이게 되고, 왼쪽과 오른쪽의 저항 차이가 매우 크게 나타나며 이

러한 전기 저항을 자기장을 통해 조정할 수 있으므로 이를 거대자기저항 현상이라고 부른다¹². 보통 금속에서의 자기저항비는 수 퍼센트에 불과하지만, 1nm 정도의 강자성박막과 비강자성 박막을 겹쳐 만든 다층막에서는 수십 퍼센트 이상의 자기저항비를 만들어 낼 수 있다. 이러한 자기저항현상을 이용한 자기헤드(Magnetic Head)가 하드 디스크 드라이브에 사용되기 시작하면서, 하드 디스크 드라이브의 용량은 비약적으로 늘어날 수 있게 되었다. 이후에도 스핀트로닉스는, 이 기술만이 가지고 있는 비휘발성, 초저전력 등의 여러가지 장점과 기존 전자소자와의 호환성 등으로 인하여 2000년 초 미국 국가 과학기술자문회의 기술위원회가 차기 산업혁명을 이끌 국가 나노기술로 지정하여 더욱 큰 주목을 받았다. 이후 산업계 및 학계의 뜨거운 관심 아래에 스핀트로닉스를 기반한 다양한 물리적인 기초 연구 및 응용소자(스핀-메모리, 스핀-논리소자, 스핀-통신소자 등)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[그림 8]¹³.

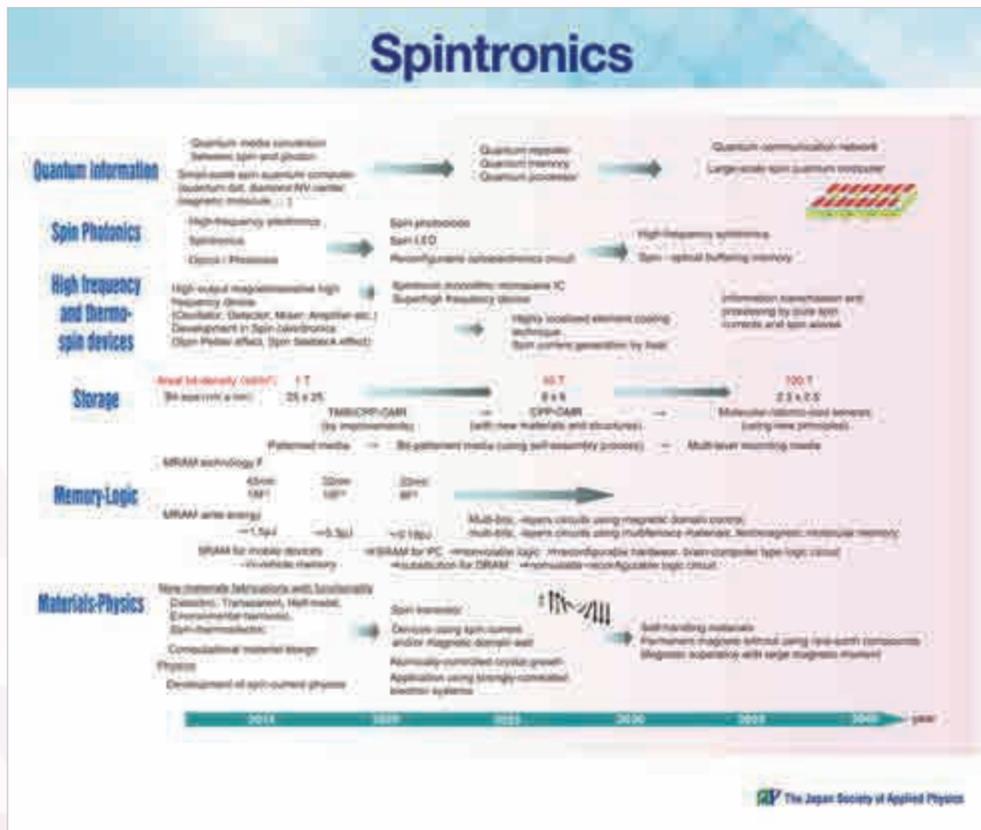


그림 8. 스핀트로닉스 로드맵

응용분야 I. 메모리 소자

스핀 정보저장 기술에서 가장 대표적인 소자는 자기저항효과를 기반으로 하는 자기저항 메모리(magneto resistive random access memory, MRAM)이다. 앞서 소개하였듯이, 1986년 프랑스의 과학자 Fert와 독일의 과학자 Grünberg(2007년 노벨 물리학상 공동 수상)가 외부자기장에 의해 소자의 저항이 변화하는 거대 자기저항효과를 발견하였다¹². 이 기술은 컴퓨터 HDD의 재생헤드 등 실제 응용분야에 성공적으로 적용되어 왔으며, 새로운 스핀트로닉스 기술 분야로의 길을 열었다. 한편, 1995년에 미국과 일본의 과학자인 Moodera와 Miyazaki는 두 강자성체 전극 사이에 절연체 박막이 있는 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)에서 양자역학적 터널링을 이용하여 상온에서 상당한 크기의 터널 자기저항 효과(tunnel magnetoresistance, TMR)를 얻을 수 있음을 보여주었다^{14,15}. 강자성체에서는 스핀(자화)방향에 따라 전자밀도가 다르기 때문에 GMR 및 TMR 소자에서 두 강자성체의 자화방향이 평행할 경우와 반평행할 경우의 저항이 다르게 된다[그림 7]. TMR은 하드 디스크의 재생헤드의 성능을 크게 향상시켰을 뿐만 아니라, MRAM이라는 개념을 제품으로 실현하는데 큰 역할을 하였다. 실제로 미국의 Everspin사는 자기터널접합을 이용하여 16Mb급 MRAM소자를 개발함으로써 성공적으로 battery-backup SRAM(static random access memory) 시장을 대체하였다¹⁶.

최근에는 차세대 MRAM인 스핀전달토크(spin transfer torque, STT) MRAM이 활발히 개발되고 있다. STT-MRAM은 자기저항효과와 전류구동 자화반전(current induced magnetization switching, CIMS)이라는 두 가지 개념에 기반하여 작동하는 소자이다. 기존 1세대 MRAM에서는 도선에 전류를 흘려서 전류에 의해 생성되는 자기장으로 메모리 셀을 스위칭 하는 방식을 사용하지만, STT-MRAM에서는 스핀전달토크 현상을 이용하여 메모리 셀을 전류로 직접 스위칭 시키는 기술을 사용한다. 전류구동 자화반전 소자의 개념은 Berger와 Slonczewski가 1996년에 독립적으로 발표한 스핀전달토크 이론에 근거하고 있다^{17,18}. 스핀전달토크 현상은 스핀트로닉스 기술에 새로운 지평을 열었다. 기존 MRAM에서는 셀의 크기가 작아질수록 더 많은 전류가 소모되어 소자의 크기를 작게 만드

는데 불리하였지만, 전류구동형 자화반전기술의 경우에는 메모리 셀의 크기가 작아질수록 정보기록이 오히려 용이해져 고밀도의 MRAM이 가능할 것으로 전망되고 있다[그림 9]. STT-MRAM은 2009년 ITRS Emerging Research Memory Device에 새롭게 등재되었으며 가장 유망한 차세대 메모리 소자로 꼽히고 있다¹⁹. [그림 10]에 STT-RAM과 경쟁 기술과의 기술을 비교하여 도식화 하였다.

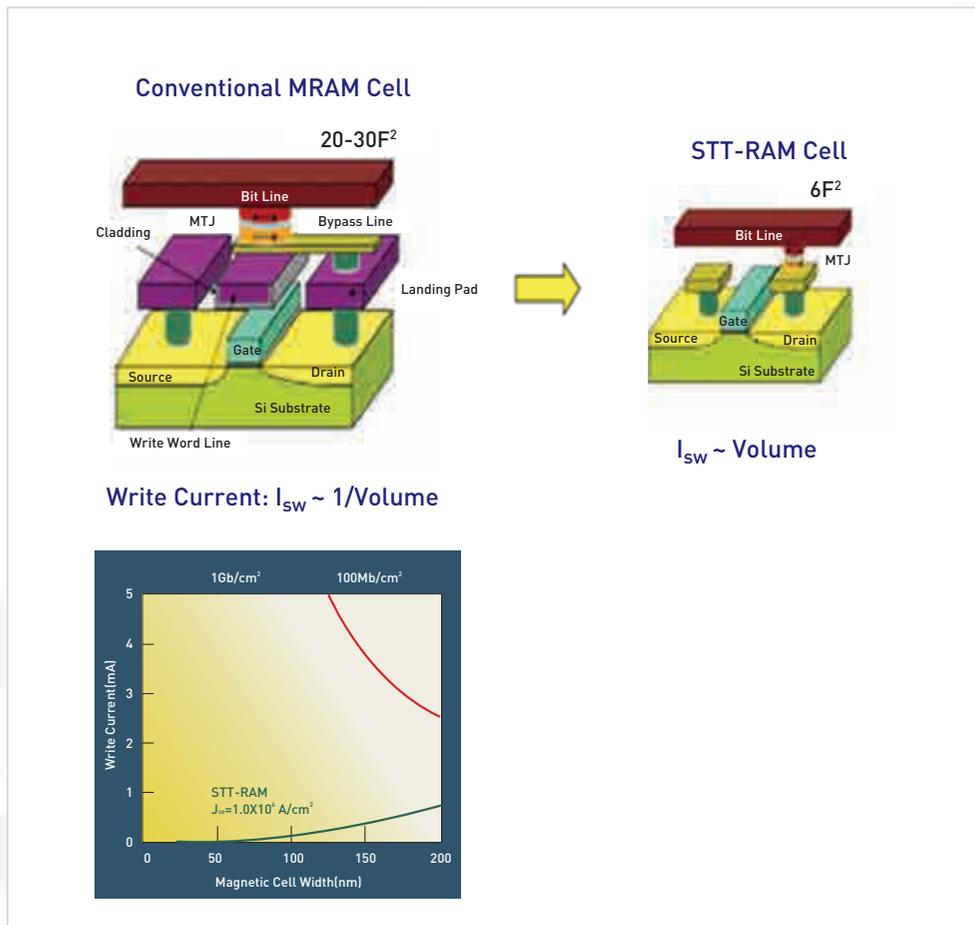


그림 9. 기존 MRAM과 STT-MRAM의 모식도 및 성능 차이점

	SRAM	DRAM	Flash (NOR)	Flash (NAND)	FeRAM	MRAM	PRAM	RRAM	STT-MRAM
NON-volatile	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Cell size [F ²]	50-120	6-10	10	5	15-34	16-40	6-12	6-10	6-20
Read time (ns)	1-100	30	10	50	20-80	3-20	20-50	10-50	2-20
Write / Erase time (ns)	1-100	15	1 μ s / 10 ms	1 ms / 0.1 ms	50/50	3-20	50/120	10-50	2-20
Endurance	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹²	>10 ¹⁵	10 ⁸	10 ⁸	>10 ¹⁵
Write power	Low	Low	Very high	Very high	Low	High	Low	Low	Low
Other power consumption	Current leakage	Refresh current	None	None	None	None	None	None	None
High voltage required	No	3V	6-8V	16-20V	2-3V	3V	1.5-3V	1.5-3V	>1.5V
	Existing products						Prototype		

그림 10. 스피너자 기반의 STT-MRAM과 기존 전자소자 기반의 메모리의 비교

STT-MRAM의 개발은 초기 상용화 단계이며 삼성전자, SK하이닉스, 일본 Toshiba, 미국 Intel, Qualcomm, 유럽 Crocus, 대만 TSMC 등에서 Embedded 또는 Stand-alone 형태로 STT-MRAM 기술 개발에 총력을 기울이고 있는 중이다. 특히 산업체에서는 고신뢰성 절연체 박막(e.g. MgO), TMR이 높은 신소재 개발, 열적안정성 및 자화반전에 유리한 수직자기이방성 소재 개발 등 구조 및 소재 최적화에 대한 연구를 활발히 진행 중이다.

한편 세계 유수의 연구소와 대학에서는 현재 개발중인 STT-MRAM의 물리적 한계를 넘어 쓰기 위해 스핀-궤도 결합 특성에 기인한 새로운 물리적 현상들과 이를 응용한 새로운 개념의 소자 개발에 대한 연구를 진행 중이다. 프랑스 SPINTEC에서는 자성박막에 존재하는 라쉬바(Rashba) 스핀-궤도 결합 토크를 이용하여 수평전류로 수직자성박막을 자화반전시킬 수 있음을 보여주었다[그림 11a]^{20,21}. 미국 Cornell 대학에서는 Ta, W, Pt 등과 같이 스핀-궤도 결합이 큰 금속계에서 스핀홀 효과로부터 발생하는 스핀전류를 이용하여 자화반전이 가능함을 보였다[그림 11b]^{22,23}.

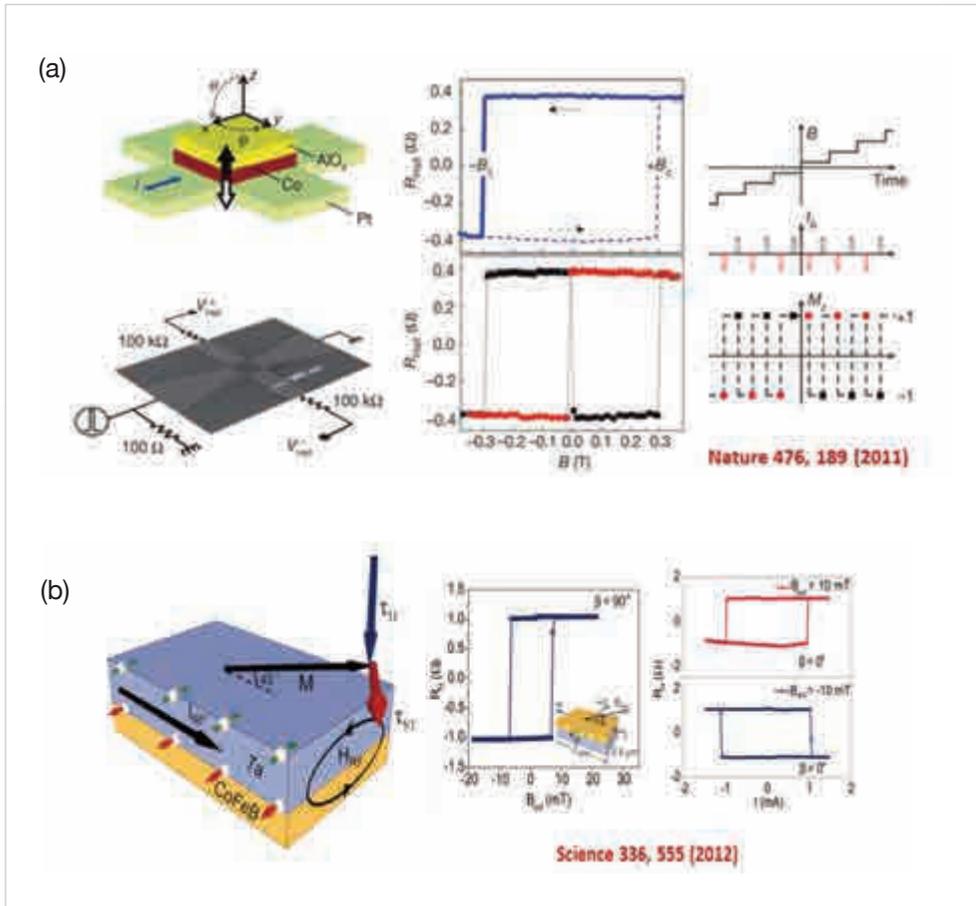


그림 11. Rashba 스핀-궤도 결합 토크 및 스핀홀 효과를 이용한 자화 반전

뿐만 아니라, 최근 미국의 MIT 그룹, IBM 그룹, 일본의 Tohoku 그룹, NIMS 그룹, 네덜란드의 Eindhoven 그룹 등도 관련분야에 새로운 연구결과를 속속 발표하고 있다. 특히 최근에는 에너지 효율이 낮은 전류구동 자화반전을 대체하기 위해 전기장을 인가하여 저전력 자화반전을 실현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본의 오사카대학교, 교토대학교, 미국 MIT, Johns Hopkins 대학교에서는 전기장을 이용한 강자성박막의 계면 자기이방성, 임계온도, 자구벽 이동의 제어에 성공했으며, 작은 전기장 펄스($\sim 1\text{V/nm}, 100\text{ns}$)를 이용한 자기터널접합의 저전력 자성스위칭 시연에도 성공했다²⁴⁻²⁶.

응용분야 II. 고주파 통신소자

스핀 다이오드(spin-diode) 효과는 스핀트로닉스 소자에 스핀 공명주파수 영역대의 마이크로 웨이브(microwave) 전류를 주입했을 때 일어나는 정류 효과이다. 즉, 스핀트로닉스 소자에 스핀 분극된 교류를 흘려 주었을 때, 스핀 모멘트도 시간 의존적인 토크를 받게 되어 공명을 일으키게 되는데, 이에 따라 자기 저항도 같은 주파수로 진동하게 된다. 이것이 스핀 다이오드 효과의 기본 원리이다. 이는 한쪽 방향으로만 전류가 흐르게 하여, 전파 등의 교류 신호를 직류신호로 바꾸는 기능을 한다. 스핀 다이오드 소자는 기존의 반도체 다이오드 소자와 유사한 기능을 하지만, 그 기본 원리가 다르며, 보다 구현이 쉬운 자기저항을 가진 스핀물질에 교류 전류를 주입하여 구현이 가능하다. 스핀 다이오드 소자는 자기저항 효과와 자기흔들림의 운동을 이용하여, 휴대폰, 위성방송, RFIC태그, 초고속 멀티플렉스 등 무선 통신이나 군사용 장비에서 사용하는 고주파 신호 검출기로 응용이 가능하다. 이는 기존 전자소자에 비하여 훨씬 향상된 감도, 투과력 등의 장점과 특성을 가지고 있기 때문에, 기존의 전자소자 성능을 상회할 것으로 기대된다.

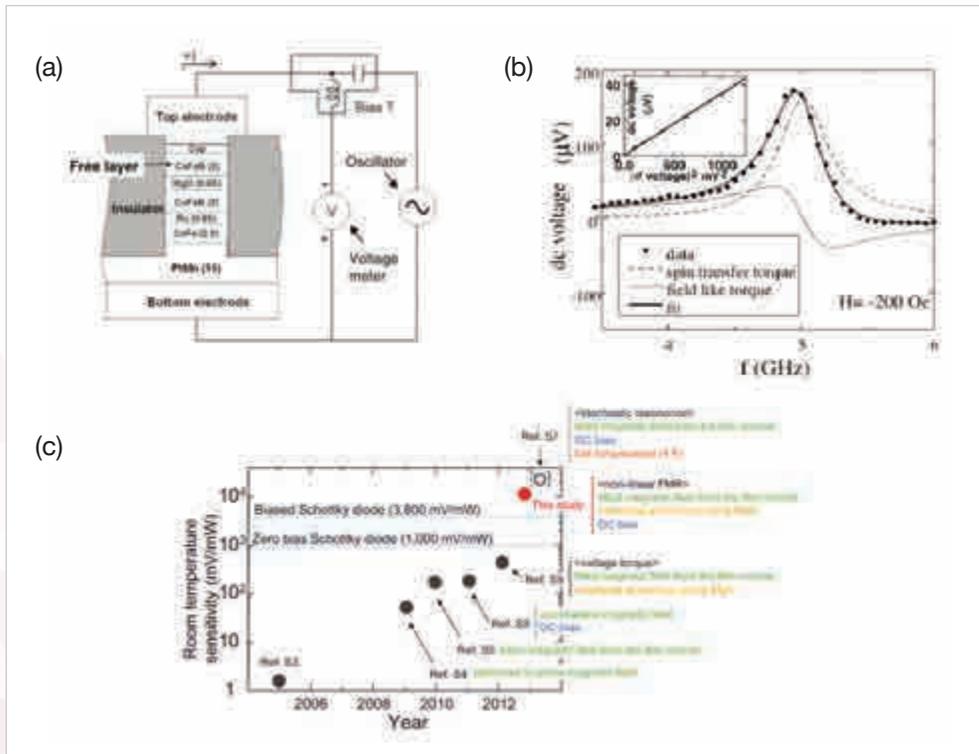


그림 12. (a) 스핀 다이오드 측정 방법의 개요, (b)스핀 다이오드 스펙트럼의 예시와 측정 예시 (c) 스핀토크 다이오드 감도

교류 감지 감도는 보통 입력 교류전력 대 출력직류 전압의 비로 표현되는데, 특별히 mV/mW의 단위가 사용된다. 예를 들어 상용 schottky diode 검출기가 3,800 mV/mW이다. 2005년에 오사카 대학에 있는 Y. Suzuki 교수 그룹에서 교류신호정류가 MTJ에서 처음으로 가능함을 보여 주었지만, 그 감도는 1.4 mV/mW으로 반도체의 기존 Schottky diode 검출기(3,800 mV/mW)보다 훨씬 낮았다²⁷. 하지만 그 후 많은 노력과 물리적인 이해를 통해 그 감도가 개선이 되었다. 더 좋은 감도를 얻기 위해서는 작은 인가 전류에서 좀 더 큰 저항 변화를 얻으면 되는데, 이를 위해 여러가지 방법들이 도입되었다. 전하-스핀 변화비를 크게 하거나, 더 큰 자기 저항 구조(예를 들어 큰 TMR값을 가진 부도체인 MgO를 이용한 MTJs)를 길게 하거나, 혹은 강자성 영역의 최적화를 수행하는 등 여러 가지 시도가 이루어지고 있다. 이러한 시도 등을 통해 상온에서 12,000mV/mW까지 RF 신호 검출 감도를 얻었다는 것을 일본의 Suzuki 그룹이 2013년에 보고하였다²⁸. 이는 기존 반도체 다이오드 검출기로 얻을 수 있는 감도보다 몇 배 큰 것으로 실질적인 응용 가능성이 있음을 증명하였다[그림 12]²⁷.

나노기술과의 융합을 통한 나노 스핀 오실레이터는 스핀 자화된 전류에 의해 나노 크기의 자기 모멘트를 1-50 GHz 영역의 주파수로 공명하도록 유도 하고, 자기저항효과를 통하여 교류 영역의 전압 신호를 발생시킨다²⁹. 여기에는 물리적으로 스핀 토크의 중요한 의미가 내재되어 있는데, 그 스핀 토크 성분 중 한 성분이 강자성박막의 고유 자기 감쇄를 충분히 상쇄시킬 수 있을 때 비로소 이 현상이 발생이 된다. 해당 현상을 이용하면 직류전류, 즉 전기적으로 제어가 가능한 교류소자를 굉장히 작게 구현 할 수 있게 되어, 현재 사용하고 있는 교류소자의 크기와 그 소비전력을 수십 배 개선 시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 2003-4년 Cornell 그룹과 NIST그룹이 나노 컨택 구조에서 처음으로 직류 전류에 의한 공명 현상을 관찰한 이후로^{30,31}, 여러 다양한 종류의 구조, 예를 들어 볼텍스 자이레이션(vortex gyration), MgO 터널 barrier를 기반한 MTJ구조, 그리고 수직화된 자기구조 등, 직류전류에 의한 magnetic self-oscillation이 현상이 일어나는 것을 관찰하였다. 자성학의 긴 역사를 볼 때, 자기 오실레이션 현상은 그 연구역사가 상당히 짧고, 스핀 토크에 의해서만 일어나는 흥미롭고 특이한 현상이다. 실질적으로 시장에서 쓸 수 있는 조건을 만족하기 위해서는 그 출력 전력, 선폭 혹은 품질 등에서 상당한 개선이 필요하고 현재로서는 많은 장벽이 있기는 하다.

응용분야 III. 반도체기반 논리소자

스핀트랜지스터는 반도체 채널과 강자성 전극의 하이브리드 구조를 이용하여 전계 트랜지스터의 특성을 구현하는 새로운 개념의 소자이다. 스핀의 정보를 반도체 채널에 전달하고 입력된 스핀의 방향을 게이트 전계로 조절하여 동작시키는 소자이다. 이러한 스핀트랜지스터는 같은 전하량이 전달되더라도 스핀이라는 또 하나의 제어할 수 있는 변수가 있어 다양한 기능을 할 수가 있다. 스핀의 방향에 따라 채널이 ON 또는 OFF 되어 기존의 실리콘 전계 트랜지스터가 수행하는 기능을 할 뿐만 아니라 비휘발성을 이용한 메모리 기능도 갖추어 차세대 논리 및 정보저장 통합소자로의 적용이 가능하다.

위에서 설명한 Datta-Das가 1990년에 이론적으로 제안한, 스핀 전계효과 트랜지스터 (spin Field Effect Transistor)는 전자의 스핀을 이용하여 저항을 변화시키는 신개념 트랜지스터 소자로 비휘발성, 저전력, 초고속 소자로서의 잠재력을 인정받아 미국, 일본 등을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔다³². 국내에서 반도체를 기반으로 한 스핀트랜지스터 및 스핀주입 기술 등에 대한 연구는 KIST에서 주로 연구하고 있으며 재료, 물성 및 스핀 이론에 관한 연구는 서울대, 고려대, KAIST, 포스텍 등에서 수행하고 있다.

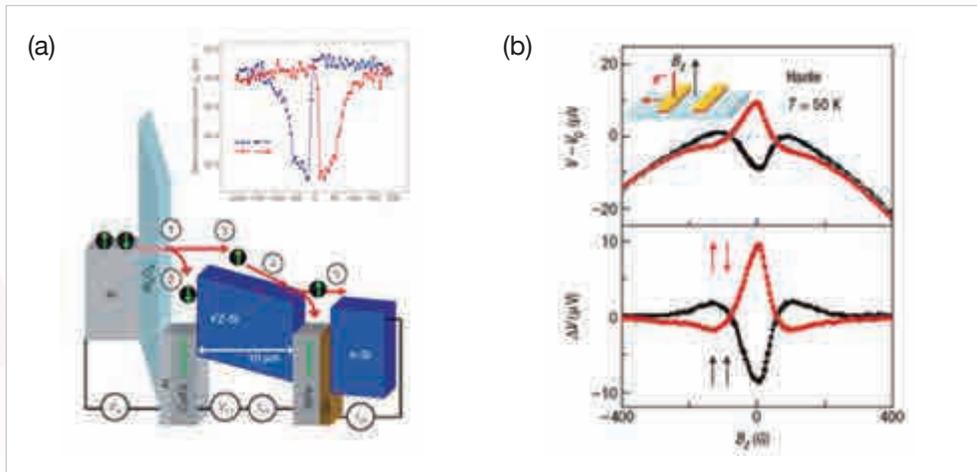


그림 13. (a) 반도체상에서의 스핀 주입 및 (b) Hanle효과를 이용한 스핀신호의 측정

스핀트랜지스터 구현을 위한 반도체로의 스핀주입은 기존 금속으로의 스핀주입과 달리 강자성체와 반도체의 저항차이로 인한 접합면에서의 산란으로 인해 매우 난이도가 높은 기술이다. 특히 전기적 방법으로 반도체에 스핀주입이 성공한 것은 2007년 이후에나 가능하였던

일이다[그림 13]^{33,34}. 이론으로 제시했던 스핀트랜지스터가 세계최초로 구현된 것은 2009년 KIST 연구그룹에 의해서이다³⁵. 실험상 난이도가 높은 이유는 상대적으로 높은 주입률과 라쉬바(Rashba)효과(전기장을 유효자기장으로 전환하는 효과)가 동시에 큰 시스템을 찾기 어려워 동작할 수 있는 채널의 범위가 매우 한정되어 있기 때문이다. 하지만 KIST 연구진은 스핀트랜지스터의 구조도와 InAs 양자우물을 이용하여 제작한 게이트로 스핀트랜지스터를 구현하였다³⁵.

위에서 설명한 스핀반도체 기반의 논리소자가 기존의 CMOS 기반 논리소자를 대체하기 위해 일본·미국 등 선진국을 중심으로 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 스핀주입효과 향상, 스핀소재 개발 등에 많은 연구가 진행되고 있다. 스핀논리소자는 기존 실리콘 소자에 스핀동작 부분을 더해서 성능을 향상시키는 방법과 스핀제어만으로 모든 논리기능을 하는 all-spin 논리소자로 나눌 수 있다. 스핀전류만으로 논리소자를 제안하거나 시뮬레이션으로 보여준 경우로는 2007년 UC 샌디에고와 2010년 퍼듀 대학이 있다[그림 14(a),(b)]^{36,37}. 두 그룹은 스핀의 축적과 흐름으로 강자성체와의 정렬관계를 이용하여 논리소자를 제안하였으나 실험적으로는 완벽한 논리기능을 실현하지는 못하였다. 이와는 조금 다른 개념으로 반도체의 avalanche를 이용하여 자기장과 전기장으로 저항을 제어하는 논리소자를 2013년 KIST와 고려대의 공동연구로 보여주기도 하였다[그림 14(c)]³⁸. 그 외에 국내에서는 메모리 중심의 스핀과제를 중심으로 연구가 진행되고 있어 스핀 논리소자에 대한 연구는 활발하게 진행되지 못하고 있는 실정이다.

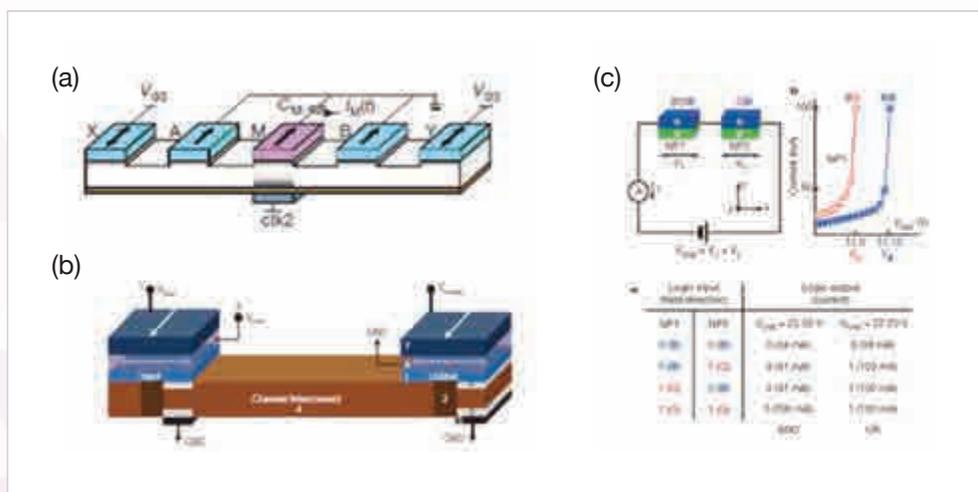


그림 14. 스핀트로닉스 기술을 이용한 스핀트랜지스터. (a) UC 샌디에고 (Nature 2009년) (b) 퍼듀대 (Nature Nanotech 2010년)에서 제한한 구조 (c) KIST/고려대에서 구현한 스핀논리소자

스핀트로닉스의 미래: 신개념 스핀트로닉스 소자를 향하여

1. 스커미온 (Skyrmion)을 이용한 차세대 메모리 개발

스커미온은 액정, Bose-Einstein 응집, 양자홀 강자성체, 자성 박막, Dzyailoshisky-Morya(DM) 상호작용을 가지는 물질 등에서 발견되는 위상학적 솔리톤(Soliton)의 한 종류로 이 개념을 처음으로 도입한 영국 물리학자 T.H.R Skyrme의 이름을 따 명명되었다. 특히 스핀계에서 나타나는 스커미온을 자성 스커미온(magnetic skyrmion)이라 부르는데, 이는 스커미온 수로 불리는 위상수(topological number)에 의해 특징지어지는 위상학적으로 안정되고 입자적인 성격을 지니는 스핀 배열이기 때문이다³⁹. 이와 같은 자성 스커미온의 예를 [그림 15]에 나타내었는데, a와 b는 같은 스커미온 수를 가지는 3차원 스커미온의 예이며 c는 2차원에서의 자성 스커미온의 예이다. 이와 같은 스핀배열에서 스커미온 수는 스커미온을 구성하는 각 스핀의 공간상에서의 회전정도의 총합을 의미 한다.

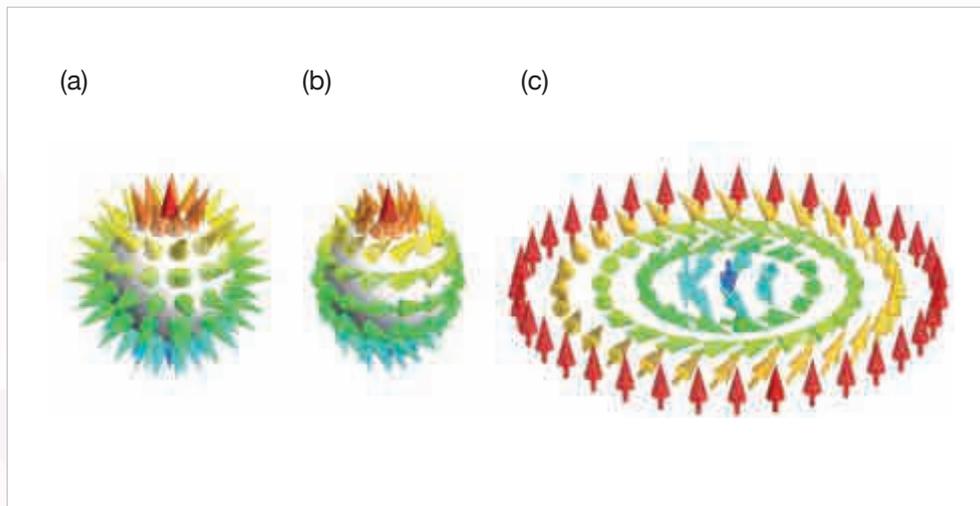


그림 15. (a), (b) 위상학적으로 1의 숫자를 가지는 3차원 스커미온 및 (c) 스커미온의 2차원 모식도

[그림 15]에 나타낸 3차원 자성 스커미온의 절반에 해당하는 자성 vortex에 대한 연구는 자성 금속의 나노 구조 형성 기술의 발전과 더불어 지난 10여년간 꾸준히 발전해 왔다. 특히 자성 금속의 원형 나노점의 경우 지름과 두께에 따라 스핀 배열이 달라진다. 대략 지름 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$, 두께 $20 \sim 50 \text{ nm}$ 정도의 Permalloy 원형구조에서 나타나는 자성 vortex의 스핀 구조 및 vortex 중심의 동역학은 자기력현미경(Magnetic Force Microscopy, MFM)이나 스핀전자현미경(Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis, SEMPA), X-선 광전자분광현미경(X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM), X-선 자성현미경(X-ray Magnetic Microscopy) 등의 측정방법으로 연구된 바 있다[그림 16]⁴⁰.

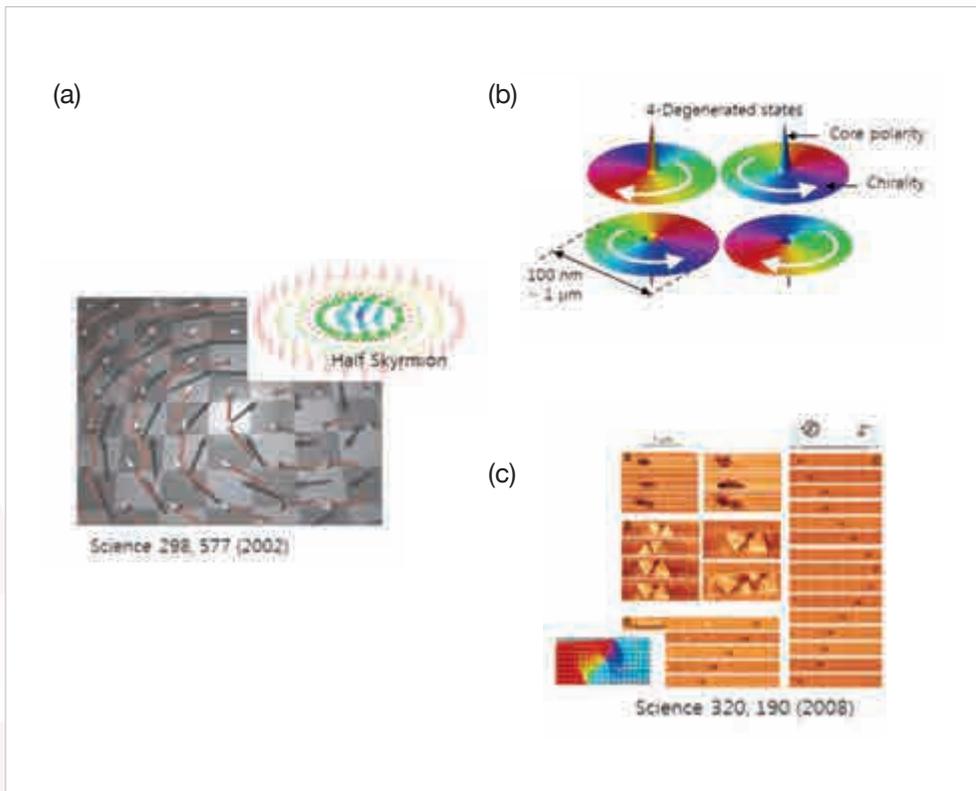


그림 16. 전체 스커미온의 절반에 해당하는 vortex 상태 (a). Vortex 상태는 핵과 핵주변의 스핀방향에 따라 에너지적으로 동등한 4개의 상태를 가진다. (c) 수평자성을 가지는 선 시료에 존재하는 볼텍스상태

스키미온이 갖는 가장 큰 특징은 위상학적 객체라는 점이다. 따라서 자성 스키미온의 경우 이러한 위상학적 특징으로 인해 강자성체 등 일반적 자성체에서 보이는 것과는 다른 현상이 나타난다. 최근에 이루어지고 있는 스키미온 동역학에 대한 전산 흉내내기⁴¹ 등의 결과 등을 살펴보면 스핀전달 토크에 의한 전류 유도 자구벽 이동과 유사한 현상이 스키미온에 대해서도 나타난다. 하지만 스키미온의 위상학적 특징으로 인해 자구벽의 이동의 경우와 달리 결합등의 영향을 크게 받지 않으며 이로 인해 이동을 위한 임계 전류가 매우 낮을 것으로 예측된다(그림 17). 따라서 자구벽 이동에 기반하여 제안된 race-track 메모리 등과 같은 방식의 미래 메모리 기술의 적용이 가능할 것으로 기대된다⁴¹⁻⁴³. 실제 메모리 소자의 발전을 위해서는 전류유도 스키미온 동역학에 대한 구체적인 연구 결과가 시급히 필요한 상황이며, 이를 바탕으로 스키미온 기반 자성 메모리 소자의 연구는 본격적으로 가능할 것이다.

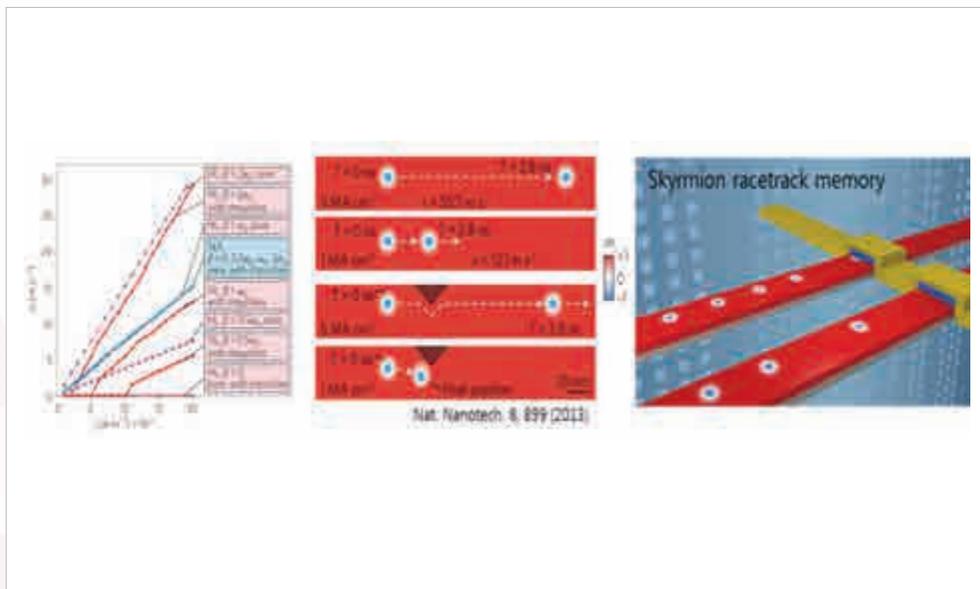


그림 17. Skyrmion의 전류에 의한 움직임 속도 예측 및 실제 메모리 소자 모식도

2. 위상절연체를 이용한 스핀제어기술

위상절연체(Topological Insulator)는 시간역전대칭성을 가지면서 특정한 위상학적 질서를 가지는 물질로 금속성의 표면 상태를 가지는 절연체를 말한다. 특유의 위상학적 질서로 인해 이 표면상태는 결함 등에 대해 위상학적으로 보호되어 후방산란이 원칙적으로 금지되고 결과적으로 표면의 전도도가 매우 높게 된다. 또한 이 표면상태의 전자는 운동량과 강한 상호작용으로 결합되어 스핀-운동량 고정(spin-momentum locking)현상을 보여주며 이로 인해 특정 방향의 스핀 분극률이 매우 높은 특징을 가진다[그림 18]⁴⁴.

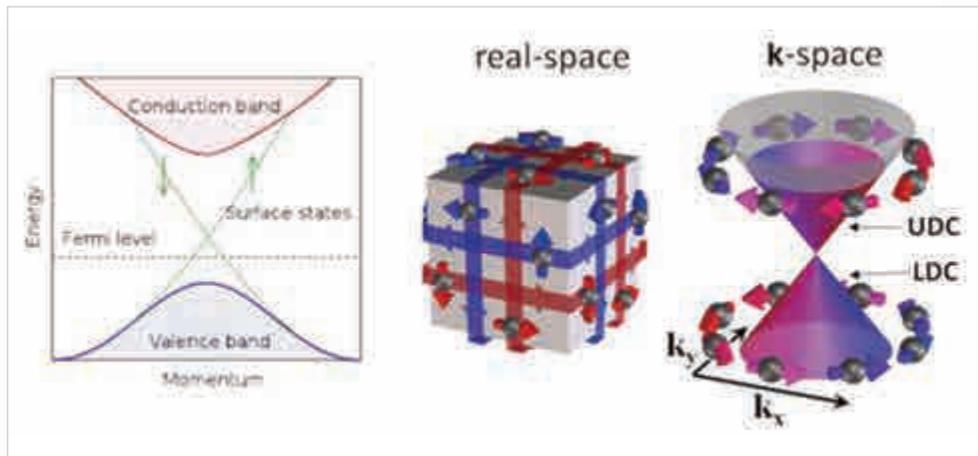


그림 18. 위상절연체의 개념과 스핀-운동량 고정

위상절연체는 기본적으로 강한 스핀-궤도 상호작용을 바탕으로 하고 있으므로 스핀 전달 물질로는 적합하지 않으며, 스핀-운동량 고정현상에 기반하여 높은 스핀 분극률을 달성할 수 있는 스핀전자원(spin source)으로 기대되고 있다. 최근 연구는 편광된 자외선이나 x-선을 위상절연체에 입사하였을 때 방출되는 광전자의 스핀 분극률이 매우 높으며 이때 광전자의 스핀 방향을 입사한 빛의 편광 방향으로 조절함으로써 3차원적으로 변화시킬 수 있음을 보여주어 위상절연체의 스핀전자원으로써의 가능성을 잘 보여준바 있다⁴⁵.

한편 최근 자성불순물이 섞인 위상절연체에 대하여 양자특이홀효과(Quantum Anomalous Hall Effect, QAHE)가 최초로 관측되어 많은 관심을 끌고 있다⁴⁶. 일반적으로 스핀궤도상호작용이 큰 경우 자기장이 걸리지 않아도 홀 효과가 관측되는 스핀 홀 효과는 GaAs의 2차

원 기체계에서 관측된 바 있으며 특히 HgTe/CdTe와 같은 위상절연체에서는 양자 스핀 홀 효과가 관측된 바 있다. 그런데 자성불순물이 섞인 위상절연체에서는 자성 불순물에 의한 강자성 질서가 형성되고, 이것이 자기장과 같은 역할을 하여 QAHE가 관측될 것이라는 이론적 예측이 있었으며 최근에 $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{0.1}\text{Sb}_{0.9})_{2-x}\text{Te}_3$ 시료에서 이에 대한 실험적인 관찰이 보고 되었다⁴⁶. [그림 19]에 나타낸 바와 같이 양자 스핀 홀 효과와는 달리 QAHE의 경우가 장자리 전류(edge current)가 한쪽 스핀 방향으로 편극되어 있어 향후 자기장이 필요없는 스핀 필터로 사용할 수 있을 것으로 예상되어 다양한 조건과 시료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 위상절연체는 그 표면 상태로부터 높은 스핀분극률을 가지는 전자를 뽑아낼 수 있다는 점이 확인되어 스핀트로닉스 소자를 위한 스핀전자원으로 활용할 수 있는 잠재성이 크다고 할 수 있다. 그러나 결함으로 인해 덩어리 상태가 완전한 절연상태가 아닌 점, 결함에 의한 전하 도핑의 문제, 박막으로 만들었을 때의 시료의 품질 등에서 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다. 최근에는 다양한 3원소 혹은 4원소 위상절연체에서 이전에 비해 한층 향상된 특성을 보이는 결과들이 발표되고 있는 중이다. 하지만 이외에도 위상절연체와 다른 자성체의 접합 등 향후 해결해야 할 과제가 산적해 있다.

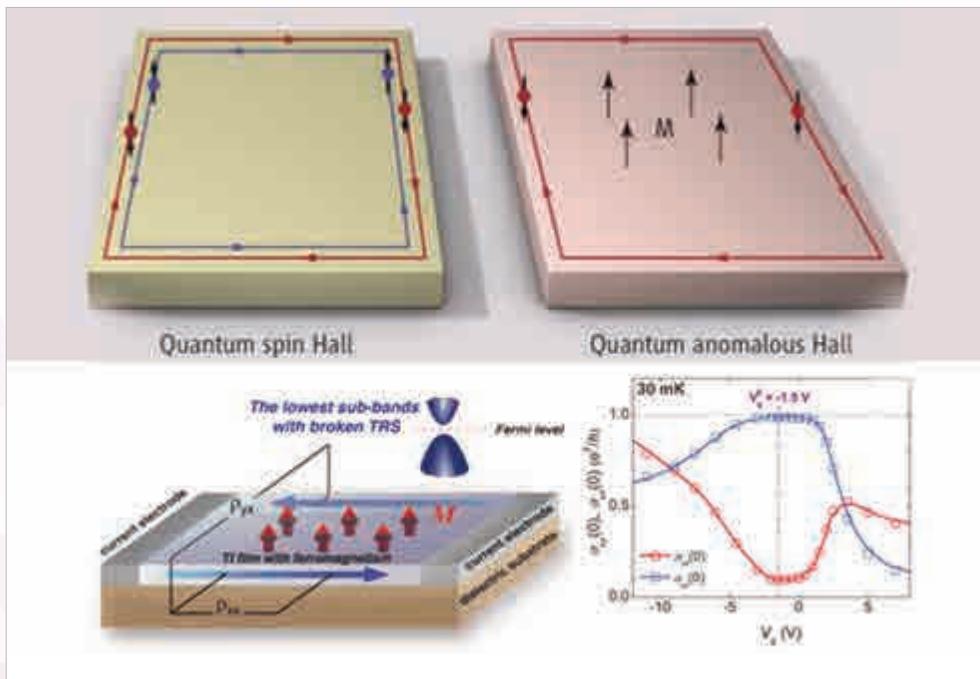


그림 19. 양자스핀홀효과와 양자특이홀효과와의 비교

3. 그래핀 및 2차원 채널 기반의 스핀트로닉스 소자

탄소 원자가 육각형 구조를 이루고 있는 단일 원자층, 즉 그래핀은 1950년대부터 이론적인 탐색이 활발히 진행되었는데 실험적으로 접근이 가능한 실체를 드러낸 것은 비교적 최근으로, 2004년 영국 맨체스터 대학의 Geim교수 연구팀이(2010년 노벨 물리학상 수상) 그래핀의 존재와 고유의 전기적 특성을 보고하면서 부터이다⁴⁷. 이 후 그래핀 제작 방식의 간편함과 더불어 그래핀만의 우수한 특성들이 알려짐에 따라 전 세계적으로 그래핀 관련 연구결과들이 폭발적으로 증가하였다. 현재에도 학계 및 산업계의 많은 연구진들이 새로운 꿈의 소재로서 그래핀의 가능성을 탐색하고 있다. 스핀전자소자 분야에서도 그래핀은 중요한 역할을 할 것으로 기대되는데 카본나노튜브(CNT)와 마찬가지로 그래핀은 가벼운 탄소로만 이루어져 있기에 스핀-궤도 상호작용과 핵 스핀과의 상호작용(hyperfine interaction)이 작아 그래핀 특유의 빠른 전하 이동도와 더불어 그래핀으로 주입된 스핀 정보가 상대적으로 긴 수명(spin lifetime)을 가지고 먼 거리를 이동할 수 있을 것으로 예측된다.

실제로 그래핀의 발견이 보고된지 얼마 지나지 않아 네덜란드 Van Wees교수 연구진에서 그래핀에서의 스핀수송현상을 측정하였다[그림 20]⁴⁸. 그래핀을 채널로 하는 스핀 밸브 구조에서 비국소측정법(non-local measurements)을 통해 그래핀으로 주입된 스핀정보가 상온에서 1 ~ 1.5 마이크로미터 떨어진 곳에서 검출 가능함을 최초로 보여주었다. 하지만 실제로 주입된 스핀이 유지되며 확산되는 거리의 실험적 측정값이 이론적으로 기대되는 값보다 백 배정도 짧게 측정되어 이에대한 원인을 규명하기 위한 후속 연구들이 요구되었다.

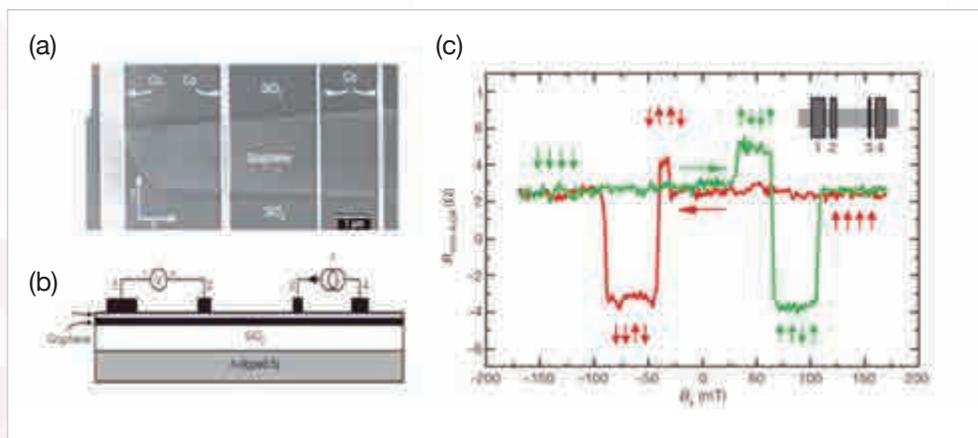


그림 20. 그래핀에서 관찰된 스핀 수송 현상

현재 프랑스에서는 Fert교수 연구팀을 중심으로 그래핀을 활용한 스핀수송현상 연구가 이루어지고 있다. 이 팀에서는 특히 SiC 위에서 길러진 에피탁시 그래핀(epitaxial graphene) 등 웨이퍼 스케일의 대규모 그래핀 스핀전자소자 제작 및 특성 분석에 중점을 둔 연구가 주로 진행되고 있다⁴⁹. 최근 결과에 따르면 그래핀에서 이론적으로 예측되는 정도의 스핀수명(스핀확산거리~100마이크로미터)을 간접적으로 측정하였으며, 이를 뒷받침하는 이론적 토대도 제공하였다.

한편 미국에서는 IBM사 및 여러 기관에서 CNT 연구에 이어 그래핀스핀소자 연구도 수행하고 있는데, 특히 UC Riverside의 Kawakami 연구팀이 그래핀에서의 스핀 수송 연구를 주도하고 있다. Kawakami교수 연구팀은 MgO를 터널장벽으로 사용하여 그래핀으로의 스핀 주입 효율을 월등히 향상시켰으며, 그래핀으로의 스핀주입시 터널장벽과 스핀신호와의 관계를 밝혔다⁵⁰. 또한, 그래핀 스핀밸브소자 위에 다른 물질들을 도포하면서 스핀수송현상의 변화를 실시간으로 측정하는 방법을 통하여 그래핀 채널에서 스핀완화기작(spin relaxation mechanism)을 밝히는데 실마리를 제공하기도 하였다⁵¹. 이러한 성과들을 바탕으로 Kawakami 교수를 주축으로 그래핀을 기반으로 한 스핀로직소자 구현[그림 21]을 제안하였고, 이 제안은 최근 “Nanoelectronics Beyond 2020 Program” 중 하나로 선정되기도 하였다⁵².

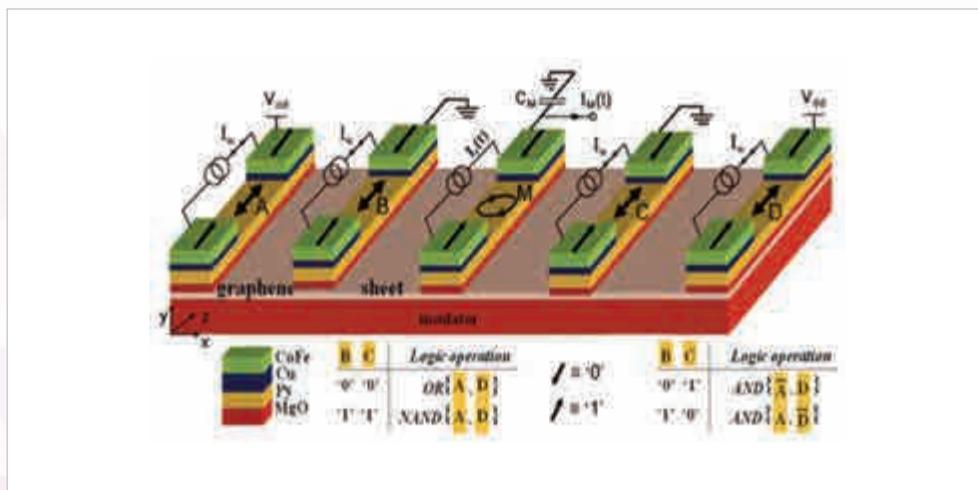


그림 21. 그래핀을 기반으로 한 스핀로직소자의 모식도

맺음말

반도체 기반 전자소자 기술은 물리적 현상 및 나노공정에 있어서 근본적인 기술적 한계에 근접하고 있으며, 이러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 차세대 전자소자 기술의 출현이 강하게 요구되고 있다. 새로운 스핀/양자 현상에 기반한 차세대 스핀 메모리 개발은 현존 기술의 패러다임을 뛰어넘는 혁신 기술임으로 기대되고 있다. 다시 말해 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 기술로서, 이를 적용한 스핀전자 소자의 개발은 기존 전자소자의 기술적 한계를 극복할 수 있는 미래유망 원천기술이다. 특히 스핀트로닉스 기술은 반도체 산업뿐만 아니라, 신소재, 정밀측정 기기 산업 등으로의 확대가 기대되고 있을 뿐 아니라, 융합 연구를 통한 지난 수년간의 매우 빠른 발전을 이제는 기존 전자소자를 뛰어넘어 새로운 스핀트로닉스 소자의 시대의 개막을 앞두고 있다.

이러한 시대 상황에 발맞추어 미국방성에서 첨단 연구를 담당하고 있는 DARPA는 스핀트로닉스 연구분야에 향후 수년간 1억 달러의 연구비를 투자하고 있다. 뿐만아니라 일본, 싱가포르 등의 국가들도 연간 수백억의 연구비를 투자해 가며 활발히 육성해가고 있는 분야이기도 하다. 하지만 현재 스핀트로닉스 기술에 투자하는 우리나라의 상황은 조금 아쉬운 부분이 있다. 21세기 거대 기간 산업의 하나인 정보저장산업은 지속적이며, 새로운 기술 혁신이 필요한 분야로 특히 우리나라의 국부 창출에 지대한 영향을 미치고 있는 산업 분야이다. 현재 스핀트로닉스 소자는 향후 차세대 비휘발성 메모리 시장을 차지할 비율이 점차 증가할 것으로 예상되고 있어, 스핀트로닉스 관련 핵심 소재 기술의 확보 및 원천특허 확보는 국가적으로 차세대 메모리 산업의 발전을 도모할 수 있을 뿐 아니라 막대한 시장을 선점할 수 있으므로 그 파급효과가 지대할 것으로 예상된다. 더 나아가, 에너지 효율이 극대화된 고성능 스핀정보소자의 개발을 통하여 모바일기기, 인공지능, 빅데이터 처리 등의 수요 증가에 따른 사회적인 요구에 적극적 대응이 가능하다. 이 밖에도 스핀트로닉스 소자기술은 정보통신, 바이오산업 등 다양한 분야에 응용 가능하여, 이미 상용화되어 거대시장을 형성하고 있는 HDD용 자기헤드, 초고감도 바이오센서 및 능동형 논리회로 등은 메모리 분야 이상으로 성장 잠재성을 가질 수 있을 것으로 평가받고 있다. 그렇기에 우리나라 또한 조금 더 적극적이며 과감한 투자를 통해 스핀트로닉스-인력 육성 및 기술 확보에 힘써으로써, 다가올 스핀-세대 (spin-generation)에 다시한번 기술 강국으로 우뚝 설 수 있기를 기대하며 이 글을 마친다.



우성훈 (Seonghoon Woo)

학 력

- MIT 재료공학과 박사
- POSTECH 신소재공학과 학사

경 력

- 現) KIST 스핀융합연구단
박사후 연구원

참고문헌

1. Waldrop, M. M. The chips are down for Moore's law. *Nature* 530, 144-147 (2016).
2. Varma, R., Dokania, V., Sarkar, A. & Islam, A. MOSFET aspect ratio optimization for minimized transistor mismatch at UDSM technology nodes. in 1-4 (IEEE, 2015). doi:10.1109/ICCCI.2015.7218134
3. Caulfield, H. J. & Dolev, S. Why future supercomputing requires optics. *Nat. Photonics* 4, 261-263 (2010).
4. Palmer, T. Modelling: Build imprecise supercomputers. *Nature* 526, 32-33 (2015).
5. Power Issues in the Datacenter: IDC Survey Results. www.idc.com Available at: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US40885516>. (Accessed: 4th August 2016)
6. Cloud et al. IT now 10 percent of world's electricity consumption, report finds. Available at: http://www.theregister.co.uk/2013/08/16/it_electricity_use_worse_than_you_thought/. (Accessed: 4th August 2016)
7. Project Natick. Available at: <http://natick.research.microsoft.com/>. (Accessed: 4th August 2016)
8. Microsoft research project puts cloud in ocean for the first time | News Center.
9. Spintronics for future information technologies: Spin currents in topological insulators controlled. Available at: <http://phys.org/news/2016-04-spintronics-future-technologies-currents-topological.html>. (Accessed: 4th August 2016)
10. ReportsnReports. Semiconductor Market Worth \$332Bn in 2015: \$40.5Bn (Approx. 12%) Will be the Global Semiconductor Equipment Market Size. Available at: <http://www.prnewswire.com/news-releases/semiconductor-market-worth-332bn-in-2015-405bn-approx-12-will-be-the-global-semiconductor-equipment-market-size-518941631.html>. (Accessed: 11th August 2016)
11. Worldwide Semiconductor Revenue Reached \$307 Billion in 2011, According to Final Results by Gartner. Available at: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1986016>. (Accessed: 4th August 2016)
12. Baibich, M. N. et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 61, 2472-2475 (1988).
13. Academic Roadmap - JSAP. Available at: <https://www.jsap.or.jp/english/aboutus/academic-roadmap.html>. (Accessed: 4th August 2016)
14. Moodera, J. S., Kinder, L. R., Wong, T. M. & Meservey, R. Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions. *Phys. Rev. Lett.* 74, 3273-3276 (1995).
15. Miyazaki, T. & Tezuka, N. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction. *J. Magn. Mater.* 139, L231-L234 (1995).
16. Everspin 16MB non-volatile MRAM coming 2009 - SlashGear. Available at: <http://www.slashgear.com/everspin-16mb-non-volatile-mram-coming-2009-2123722/>. (Accessed: 4th August 2016)
17. Berger, L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current. *Phys. Rev. B* 54, 9353-9358 (1996).

참고문헌

18. Slonczewski, J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *J. Magn. Magn. Mater.* 159, L1-L7 (1996).
 19. Meena, J. S., Sze, S. M., Chand, U. & Tseng, T.-Y. Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale Res. Lett.* 9, 526 (2014).
 20. Miron, I. M. et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. *Nature* 476, 189-193 (2011).
 21. Miron, I. M. et al. Fast current-induced domain-wall motion controlled by the Rashba effect. *Nat. Mater.* 10, 419-423 (2011).
 22. Liu, L. et al. Spin-Torque Switching with the Giant Spin Hall Effect of Tantalum. *Science* 336, 555-558 (2012).
 23. Liu, L., Moriyama, T., Ralph, D. C. & Buhrman, R. A. Spin-Torque Ferromagnetic Resonance Induced by the Spin Hall Effect. *Phys. Rev. Lett.* 106, 036601 (2011).
 24. Nozaki, T. et al. Electric-field-induced ferromagnetic resonance excitation in an ultrathin ferromagnetic metal layer. *Nat. Phys.* 8, 491-496 (2012).
 25. Shiota, Y. et al. Induction of coherent magnetization switching in a few atomic layers of FeCo using voltage pulses. *Nat. Mater.* 11, 39-43 (2012).
 26. Bauer, U. et al. Magneto-ionic control of interfacial magnetism. *Nat. Mater.* 14, 174-181 (2015).
 27. Tulapurkar, A. A. et al. Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions. *Nature* 438, 339-342 (2005).
 28. Maehara, H. et al. Large Emission Power over 2 μ W with High Q Factor Obtained from Nanocontact Magnetic-Tunnel-Junction-Based Spin Torque Oscillator. *Appl. Phys. Express* 6, 113005 (2013).
 29. Demidov, V. E. et al. Magnetic nano-oscillator driven by pure spin current. *Nat. Mater.* 11, 1028-1031 (2012).
 30. Kiselev, S. I. et al. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current. *Nature* 425, 380-383 (2003).
 31. Rippard, W. H., Pufall, M. R., Kaka, S., Russek, S. E. & Silva, T. J. Direct-Current Induced Dynamics in $\text{C}_{90}\text{F}_{10}/\text{Ni}_{80}\text{F}_{20}$ Point Contacts. *Phys. Rev. Lett.* 92, 027201 (2004).
 32. Datta, S. & Das, B. Electronic analog of the electro-optic modulator. *Appl. Phys. Lett.* 56, 665-667 (1990).
 33. Appelbaum, I., Huang, B. & Monsma, D. J. Electronic measurement and control of spin transport in silicon. *Nature* 447, 295-298 (2007).
 34. Lou, X. et al. Electrical detection of spin transport in lateral ferromagnet-semiconductor devices. *Nat. Phys.* 3, 197-202 (2007).
-

참고문헌

35. Koo, H. C. et al. Control of Spin Precession in a Spin-Injected Field Effect Transistor. *Science* 325, 1515-1518 (2009).
 36. Dery, H., Dalal, P., Cywiński, Ł. & Sham, L. J. Spin-based logic in semiconductors for reconfigurable large-scale circuits. *Nature* 447, 573-576 (2007).
 37. Behin-Aein, B., Datta, D., Salahuddin, S. & Datta, S. Proposal for an all-spin logic device with built-in memory. *Nat. Nanotechnol.* 5, 266-270 (2010).
 38. Magnetic-field-controlled reconfigurable semiconductor logic : *Nature* : Nature Research. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v494/n7435/full/nature11817.html?message-global=remove>. (Accessed: 4th August 2016)
 39. Röβler, U. K., Bogdanov, A. N. & Pfleiderer, C. Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature* 442, 797-801 (2006).
 40. Choe, S.-B. et al. Vortex Core-Driven Magnetization Dynamics. *Science* 304, 420-422 (2004).
 41. Fert, A., Cros, V. & Sampaio, J. Skyrmions on the track. *Nat. Nanotechnol.* 8, 152-156 (2013).
 42. Woo, S. et al. Observation of room-temperature magnetic skyrmions and their current-driven dynamics in ultrathin metallic ferromagnets. *Nat. Mater.* 15, 501-506 (2016).
 43. Jiang, W. et al. Blowing magnetic skyrmion bubbles. *Science* 349, 283-286 (2015).
 44. Topological Insulators – Lanzara Group. Available at: <http://research.physics.berkeley.edu/lanzara/research/ti.html>. (Accessed: 4th August 2016)
 45. McIver, J. W., Hsieh, D., Steinberg, H., Jarillo-Herrero, P. & Gedik, N. Control over topological insulator photocurrents with light polarization. *Nat. Nanotechnol.* 7, 96-100 (2012).
 46. Chang, C.-Z. et al. Experimental Observation of the Quantum Anomalous Hall Effect in a Magnetic Topological Insulator. *Science* 340, 167-170 (2013).
 47. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films | *Science*. Available at: <http://science.sciencemag.org/content/306/5696/666>. (Accessed: 4th August 2016)
 48. Tombros, N., Jozsa, C., Popinciuc, M., Jonkman, H. T. & van Wees, B. J. Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature. *Nature* 448, 571-574 (2007).
 49. Dlubak, B. et al. Highly efficient spin transport in epitaxial graphene on SiC. *Nat. Phys.* 8, 557-561 (2012).
 50. Han, W. et al. Tunneling Spin Injection into Single Layer Graphene. *Phys. Rev. Lett.* 105, 167202 (2010).
 51. Pseudospin-driven spin relaxation mechanism in graphene : *Nature Physics* : Nature Research. Available at: <http://www.nature.com/nphys/journal/v10/n11/full/nphys3083.html>. (Accessed: 4th August 2016)
 52. Semiconductor Research Corporation – SRC. Available at: <https://www.src.org/newsroom/press-release/2011/242/>. (Accessed: 4th August 2016)
-

국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 스핀트로닉스와 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

| 과제 선별 기준 |

연구 요약문 내 (스핀트로닉스) or (spintronics) or((스핀) and (트로닉스)) or ((spin) and (trionics))

분석 결과 최근 3년간 총 58건의 과제에 140억원의 연구비가 투자됨

- 연구과제 수는 크게 변화하지 않았으나, 2013년 연구비 큰 폭으로 증가함
 - 이는 한국과학기술연구원운영비지원 항목으로 스핀트로닉스 분야의 연구가 이루어지면서 연구비가 급속도로 증가함
 - 특성나노-도핑분석 지원연구(64억원), Convergence-Technology Program(8억원)
- 한국과학기술연구원(KIST)에서의 연구를 제외하고는 스핀트로닉스와 관련하여 대규모 연구는 이루어지지 않는 것으로 나타나고 있으며, 아직 연구 활성화 수준도 미흡한 것으로 보여짐

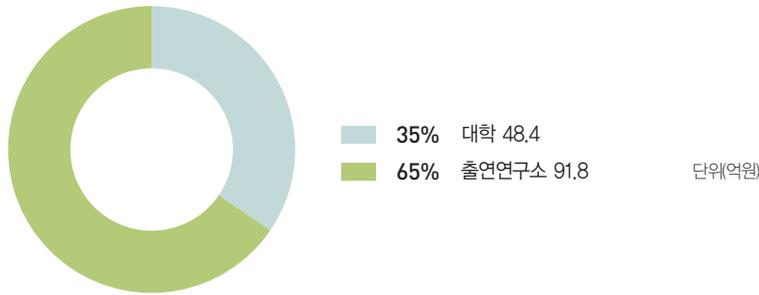
연도별 연구비와 연구과제 건수



연구수행주체 스핀트로닉스 연구는 대학과 출연연구소를 중심으로 이루어지고 있음

- 한국과학기술연구원운영비지원사업(72억원)을 제외하면 대학에서 좀 더 많은 연구가 이루어지고 있음을 알 수 있음

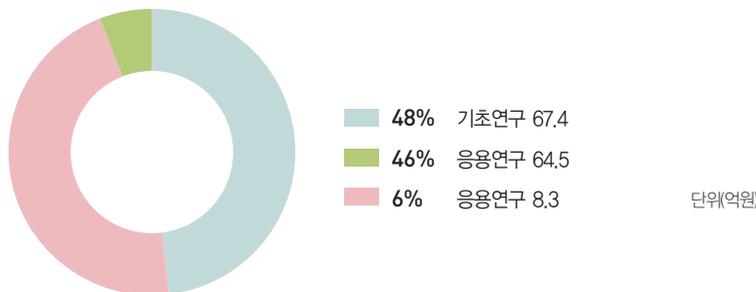
- 출연연구소의 경우에도 KIST와 한국표준과학연구원 외에는 연구그룹이 없는 것으로 나타났으며, 대학 또한 연구그룹이 많지 않은 것으로 나타남
- 이는 아직 스피트로닉스와 관련하여 우리나라의 연구 생태계 조성이 미흡한 것으로 사료됨



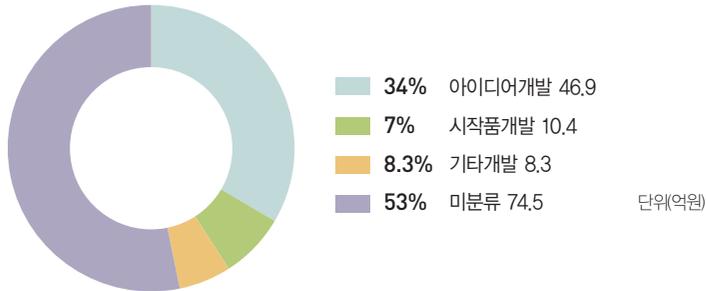
연구수준 스피트로닉스와 관련된 연구는 연구개발단계 중 기초연구단계 중심으로 이루어지고 있는 것으로 나타남

- 연구비 상으로는 기초연구와 응용연구가 각각 48%와 46%로 비슷한 것으로 나타났으나, 과제 건수로는 기초연구가 56건, 응용연구가 1건으로 압도적인 차이를 보이는 것으로 나타남
 - 이는 특성나노-도핑분석 지원연구가 응용연구로 분류되었기 때문인 것으로, 실질적으로 아직 스피트로닉스 관련 연구는 대다수 기초연구 단계임
- 연구개발성격 측면에서는 아이디어 개발이 31건, 46.9억원으로 가장 높게 나타났음
 - 연구비상으로는 미분류 항목이 많은 것으로 나타나 있으나 과제 건수로는 6건에 불과하며, 이 또한 대형과제들이 미분류로 분류되었기 때문임
- 기술수명주기적 측면에서도 도입기(48.3억원)가 가장 많은 비중을 차지할 것으로 예상되었으나, 아예 기술수명주기를 판명할 수 없는 기타(89억원)로 대다수의 연구과제가 분류됨

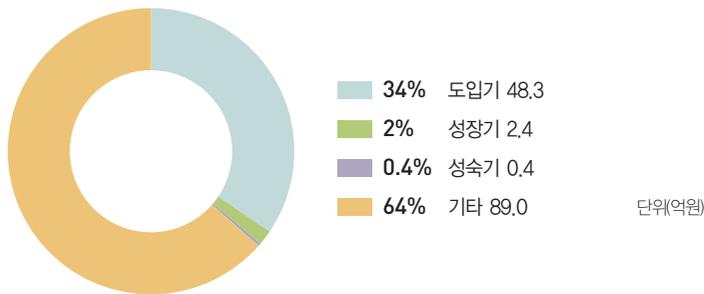
연구개발단계



연구개발성격

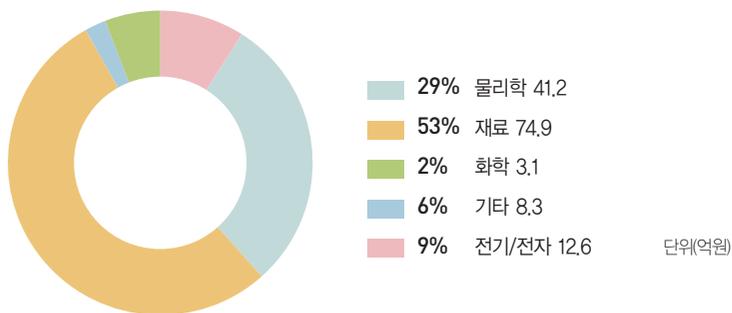


기술수명주기

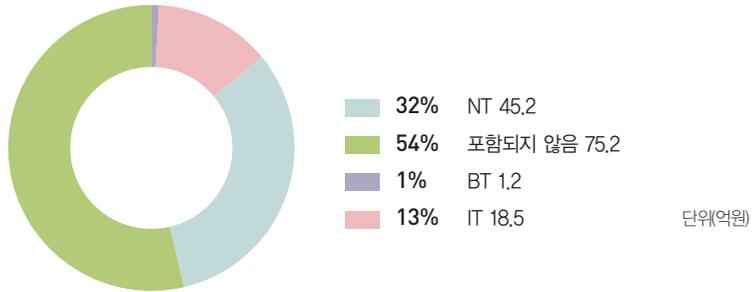


연구분야 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 재료(74.9억원, 6건), 물리학(41.2억원, 45건) 중심의 NT(45.2억원, 34건) 연구가 주를 이룸

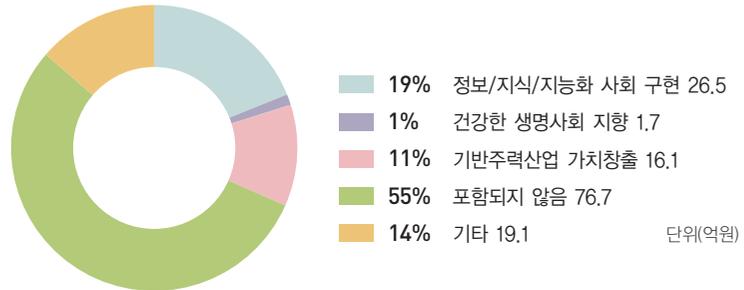
연구분야 [국가과학기술표준분류]



연구분야 [6T]



연구분야 [NTRM]



- 양자를 중심으로 한 스피트로닉스의 원리 중심의 연구개발로 인하여 물리학을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 일부 대형과제들이 재료 분야로 분류되면서 재료 분야의 비중 또한 높게 나타남
- 6T 기준에서는 스피트로닉스를 구현하는 NT연구와 이를 활용하는 IT(18.5억원, 15건) 중심으로 연구가 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남
 - 포함되지 않음이 54%로 나타난 것은 일부 대형과제들이 6T 상으로 분류되지 않아 나타난 현상임
- NTRM 분석 결과 또한 포함되지 않음이 가장 높은 비율(55%)로 나타나 있기는 하지만 정보-지식-지능화 사회 구현(26.5억원, 23건)과 기반주력산업 가치창출(16.1억원, 10건)에 많은 연구가 이루어지고 있음

극한 환경의 이해와 극복을 위한 융합연구 추진방향

▣ 부산대학교 기계공학 기계기술연구원 극한환경기술융합센터 **손창민** 교수
(changmin.son@pusan.ac.kr)



1. 극한 환경 (Extreme Environment)

극한 환경 극복을 위한 기술개발(극한 환경 기술, Extreme Environmental Technology) 이라는 주제에 대한 고찰을 시작하기에 앞서 극한 환경을 어떻게 정의하는 것이 타당한지에 대한 논의가 필요하다. 극한 환경은 이를 도전으로 인식하고 극복해야 하는 인간을 포함한 모든 생명체가 생존에 위협을 받는 조건에 해당되는 모든 환경적 요소들을 고려하여 정의해야 할 것이다. 이러한 환경적 조건들은 다양하게 나열 할 수 있지만, 생명체의 생존에 필수요소들인 물과 공기를 중심으로 생각해볼 수 있다. 최적의 조건을 벗어난 또는 오염된 물과 공기의 섭취는 모든 생명체의 생존에 심각한 위협이 되는 것은 별도의 과학적 증명이나 실험 없이도 우리 스스로 판단할 수 있다.

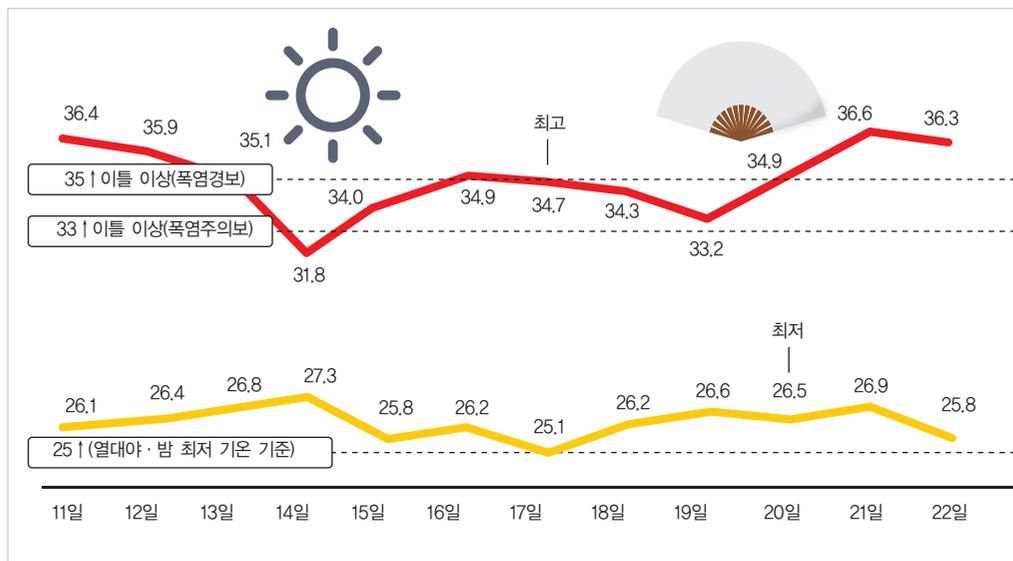


그림 1. 2016년 8월 서울지역 최저 및 최고온도 분포 (출처: 기상청)

2016년 여름, 한반도가 경험한 기록적인 고온현상(그림1)으로 인해 국민들이 감당했던 어려움들은 이러한 생존환경 변화에 따른 위협들을 피부에 와 닿게 해준다. 더불어, 우리가 경험한 위협들은 하절기 정상기온대비 약 5°C 내외의 추가 온도상승으로 인한 것이다. 이러한 날들이 지속되면서 우리의 몸과 환경은 피로가 쌓이거나 심지어 손상되는 고통을 경험하기도 한다. 따라서 극한환경의 정의는 절대적 관점에서 고온(또는 고압)의 범위를 정의하여 제한 할 수도 있겠지만, 동시에 매우 상대적이고 또 지속성과 밀접한 관련이 있는 개념임을 확인 할 수 있다. 즉 미세한 환경요소의 변화도 이러한 영향이 지속될 때 지구 생명체의 존속에 심각한 위협이 될 수 있다는 것이다.

지구에서 기대할 수 있는 극한환경이 그렇다면, 지구를 벗어난 우주에서의 극한환경은 어떤 조건들을 고려할 수 있을까? 종종 미디어를 통해 우주탐사소식을 접하기는 하지만, 일반인들에게는 여전히 미지의 분야이고, 소수의 우주인들을 통한 간접경험에 의존할 수 밖에 없는 영역이라고 할 수 있다. 영화 “마션(The Martian, 2015)”은 인간의 화성(Mars) 탐사 및 생존 시도를 영상화하여 지구인으로서 상상했던 우주에서의 극한환경에 대해 간접경험을 제공하며 흥행이 된 대표적인 영상물이다. 화성 대기의 주 성분은 이산화탄소(CO₂)이며, 온도는 -197°F(-91.7°C) ~ 86°F(30°C) 범위에서 변화한다. 앞서 설명했듯이 산소의 부족은 둘째치고라도, 화성대기의 온도변화가 최대 120°C 가 되는 것만으로 지구환경을 넘어서는 극한환경으로 볼 수 있을 것이다. 우리정부에서 추진하고 있는 달 탐사 계획으로 달에 대한 관심이 높는데 달의 온도는 화성보다 더 극심한 차이(-170°C ~ 130°C)를 보인다. 따라서 성공적인 달 탐사를 위해서 요구되는 여러가지 기술들이 있겠지만 더불어 이러한 극한 환경을 극복하는 기술은 필수적이다.

지구와 우주에서의 극한환경 요소들을 나열하면 추위, 고온, 고압, 진공, 고전압, 유해한 화학 성분 및 입자들, 전자기 복사, 진동, 충격, 습도, 오염 및 먼지, 그리고 극심한 온도변화 등이 있다. 따라서 “극한환경 기술”은 이러한 “절대적 및 상대적으로 극심한 환경요소들로부터 인간과 생명체를 보호하고 유지하는데 필요한 기술”이라고 정의할 수 있다. 극한환경 기술은 궁극적으로 “지구와 우주의 극한환경에서 생명체 보호 및 유지를 위한 창의적인 기계장치 또는 시스템(Engineering System)의 안정적 구현”을 목표로 한다. 본 리뷰에서는 이와 관련된 다양한 기술개발 노력들을 소개하고 시스템적 접근의 필요성에 대해서 강조하고자 한다.



그림 2. 마션(The Martian, 2015)

극한환경에서는 영향으로 물질들의 고유한 성질(property of material)이 변화하게 되는데, 주로 온도와 압력에 민감한 영향을 받는다. 따라서 고온 및 고압조건들과 관련한 기존의 연구들을 살펴보고자 하였다. 문헌들을 조사해보면 극한온도와 압력의 범위를 정하려는 노력들이 일부 있음을 알 수 있는데, 이는 의미 있는 시도일 수 있으나, 앞서 고찰해본 바와 같이 굳이 절대적인 개념으로 제한하기보다 상대적인 개념으로 이해하는 것이 궁극적으로 생명체의 보호 및 유지 기술이라는 정의에 더 부합된다고 판단된다.

Chatelier & Boudouard은 고온 측정과 관련한 초기 연구자들의 다양한 측정법과 장치(pyrometers)들을 소개하고 있다¹. 흥미 있는 부분은 정확한 고온 측정의 중요성과 측정법 및 장치(pyrometers)에 대한 문헌을 1782년 처음 출간한 사람은 Wedgwood로 소개되고 있다. Wedgwood는 잘 알려진 영국의 유명 도자기 회사의 이름이기도 하다. 따라서 흥미롭게도 근대사에서 도자기 공업이 고온 환경을 정밀하게 다루고자 했던 주체로 기여했다는 것을 알려

주고 있다. 이후, Zemansky는 2차대전후 1950년대 및 60년대의 극저온(absolute zero) 및 무한온도(infinite temperature) 관련 연구를 종합하는 노력을 보였다². 이 시기에는 이미 플자즈마 및 원자력 반응에 의한 온도(상승)값들이 각 각 $5 \times 10^4\text{K}$ 및 $5 \times 10^7\text{K}$ 으로 소개되어 있다.

Ulmer는 15명의 지구화학 및 지구물리 연구자들의 연구결과를 출간하며, 처음으로 고압 및 고온환경 실험에 필요한 제어, 보정 및 측정기법을 소개하고 대학원 실험실 매뉴얼로 활용될 수 있도록 하였다³. 이 시기에 고온과 더불어 고압조건을 통합해서 고려하기 시작한 점도 흥미롭다. 특히, Ulmer는 이 점을 편집본 출간의 주요한 의미들 중 하나로 소개하고 있다. Ulmer가 소개하고 있는 고압 기술은 1600년대에 Otto von Guericke가 개발한 최초의 공기 압축 펌프로써 약 400년전으로 거슬러 올라가 이룬 성과이다. 더불어 소개된 참고문헌들을 살펴보면 1960대에 고압 및 고온분야의 연구가 매우 활발히 수행되었음을 알 수 있다.



그림 3. Jasperware, the most famous of Wedgwood's inventions, first appeared in 1774 after thousands of experiments (출처: Wedgwood)

2. 극한 환경 극복기술

국내에서 극한 환경 기술에 주목하고 그 경제적 가치에 주목한 보고서로 “극한 환경 기술에서 찾는 우리의 미래”⁴을 참고할 수 있다. 보고서에서는 우주공장, 심해무인 잠수정, 쇄빙선, 해수 온실등을 대표적인 극한환경 극복기술 및 제품으로 소개하며, 특히 관련된 소재 및 로봇기술이 파급효과가 클 것으로 전망했다. 이 시기를 전후로 국내 대학연구실, 연구기관, 정부부처 등의 주도과 참여로 극한환경에서의 건축/건설기술(남극기지, 중동 등의 저온 및 고온 환경), 소재기술(복합재, 섬유등 포함), 로봇기술(달 탐사, 우주기지건설, 심해잠수정개발 등) 등의 분야에서 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 우주기지 건설분야에서는 NASA와의 국제공동 개발도 계획되고 있는 것으로 알려져 있다. 더불어 극한환경에서 서식하는 미생물 등에 대한 연구를 통해 파급효과를 도출하려는 시도도 진행 중이다. 본 리뷰에서는 이전 보고서와 중복되는 자료의 소개는 최소화하고 시스템적 관점에서 극한환경 극복기술을 고찰하고자 한다.

극한환경	극한환경 기술/제품	세부조건					상용화 시기 (년도)
		고온	저온	고압	진공	전자기장	
우주	우주공장	++	++		+++	+	2020~
심해	심해 무인잠수정		+	+++			-
극지방	쇄빙선		+	++			-
사막	해수온실	+		++			~2015

그림 4. 극한환경기술의 종류와 특징



그림 5. 건설기술연구원이 참여한 화성 우주기지 개념 설계 모델 아크햅(ArchHab)(출처: 한국건설기술연구원)



그림 6. 2020년 예정된 달 탐사를 위한 로버 시험 모델(출처: 한국과학기술연구원)

국외연구현황 및 기술수준을 판단할 수 있는 매우 유익한 연구활동으로 존스홉킨스 대학의 응용물리 연구소(Applied Physics Laboratory, APL)의 성과를 참고해 볼 수 있다. APL은 1942년 설립당시 2차대전의 승리를 위해 필요한 과학기술개발을 목적으로 하였으나 전후에는 다양한 경험들을 기반으로 도전적인 연구분야를 지속적으로 개척해왔다. Clatterbaugh 등은 APL 설립이후 축적되어온 다양한 극한환경기술 개발 경험들을 바탕으로 Engineering System을 구현하는 기준들을 체계적으로 정리하여 극한 환경기술을 소개하고 있다⁵. APL이 개발한 대표적인 극한환경기술 개발 사례인 “Implantable insulin pump”, “Deep ocean sensing system”, “Electronics in rail gun projectiles”, “Interplanetary space missions”, “Body armor”, “Microelectromechanical systems(MEMS)”를 통해서 축적된 경험들을 체계화하여 극한 환경 기술개발 전주기 절차를 (1) 요구사항 도출, (2) 시스템 설계, 신뢰성 제고를 위한 (3) 시험 평가 (Test and Evaluation) 및 (4) 모델링 및 시뮬레이션 (Modeling & Simulation)의 4단계로 제시하고 있다. 극한환경기술의 실패(Failure)는 즉각적으로 생명체의 위협이 되므로, 특히 위험도(Risk) 평가를 위한 점검표는 별도로 개발하여 함께 상세히 소개하고 있다. 즉, 다년간 축적된 다양한 분야에서의 극한 환경 기술개발 경험들을 통합하여 신뢰성을 담보할 수 있는, 개발 전주기에 걸친 기준 및 절차를 제시하고 있다. 이 점은 국내 연구자들도 반드시 고려해야 한다고 강조하고자 한다. 고도의 신뢰성을 보장할 수 없는 극한환경 기술은 그 도전적인 환경을 극복하는 신뢰성 있는 도구로 사용될 수 없기 때문이다. 이러한 사항에 의하여 APL 보고서가 극한 환경 기술의 다양한 분야를 개척해가고 있는 국내 연구자들에게 유익하다고 판단된다.

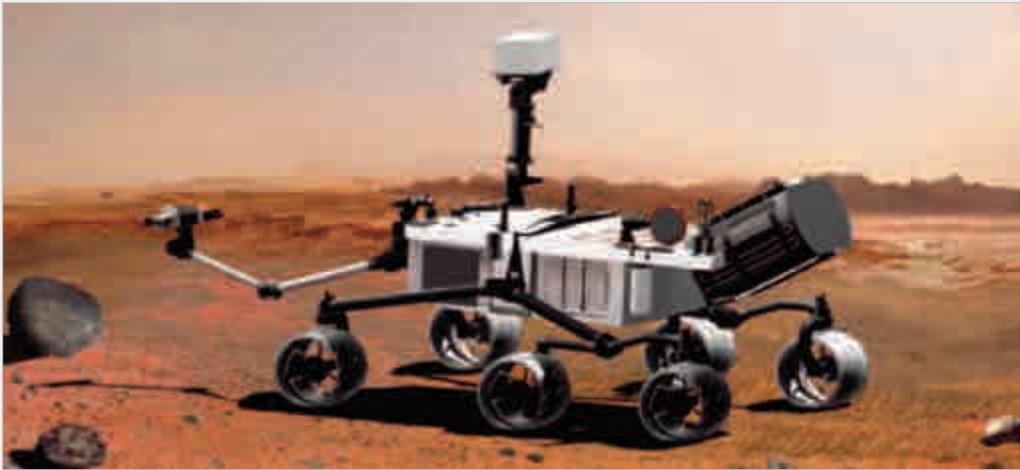


그림 7. 화성 과학연구소(Mars Science Laboratory)의 로버(Rover)⁴

Failure Mechanisms	Root Causes of Failure					
	Physical and Environmental Factors	Performance	Fatigue	Wear	Corrosion	Fracture
Chemical	Particle radiation					
	Outgassing					
	Moisture					
	Salt spray					
	Chemical environment					
	Mold and mildew					
Physical	Intermetallic formation				X	
	Material properties					
Structural	Manufacturing defects					
	Dimensions					
Electrical (includes electrostatic, magnetostatic, and electromagnetic effects)	Static electric field (i.e., ESD)					
	Static magnetic field					
	Electromagnetic radiation (EMR)					
	Corona					
	Electro-migration					
	Eddy current heating					
Mechanical	Joule heating					
	Vibration					
	Acceleration					
	Static loading					
	Dynamic loading					
	Impact					
Thermal	Handling					X
	Temperature range	X	X			
	Temperature loads					
	Material phase change					

Subsystem: Main activities electronics components; globe-top encapsulated integrated circuits; failure sites were fixed.

그림 8. 시스템 요소들의 물리적 고장 가능성을 확인할 수 있는 체크리스트

한편, 현재 미국에서는 국가적인 역량개발 전략의 일환으로 2009년부터 Department of Energy(DOE)가 주도하고 있는 Energy Frontier Research Centers(EFRCs) 프로그램을 통해서도 극한환경 기술연구를 지원하고 있다. 총 32개가 운영 중인 EFRCs 의 하나로 Energy Frontier Research in Extreme Environment(EFree) 그것이다. EFree 는 Carnegie Institute of Washington의 주도로 4개 대학이 참여하고 있다. 연구센터의 주요 임무는 극한환경에서 에너지 변환기술 개발 및 소재로 활용될 수 있는 안정적인 물질의 설계 및 합성물질의 개발이다. 극한환경에서 필수적인 생명체 보전 및 유지 시스템의 작동을 위해서는 안정적인 동력원 또는 에너지시스템 기술이 핵심역량이기 때문에 장기적인 기술개발을 수행 중이라고 판단된다. 특히, 전문연구기관과 대학 실험실이 공동으로 혁신적인 기술을 발굴하는 노력을 수행하고 있는 점을 통해 극한 환경 기술개발을 위해 다양한 조직(인력), 기술의 융합을 통한 창의력 도출이 필수적임을 간접적으로 알 수 있다.

Energy Frontier Research in Extreme Environments (EFree)
Russell J. Hemley (Carnegie Institution of Washington)

EFRC Mission Statement:
To accelerate the discovery and synthesis of kinetically stabilized, energy materials utilizing extreme conditions.

<https://efree.carnegiescience.edu/>

RESEARCH PLAN
By use of advanced extreme conditions techniques, EFree discovers, creates, and characterizes paradigm-shifting, transformative energy materials, including the synthesis and recovery of novel structural, energy conversion, and energy transport materials.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY Office of Science
 EFree

그림 9. 극한 환경 첨단 에너지 연구 개요

체계적이고 전략적 접근이 필요한 극한환경의 하나로 재난환경을 대표적으로 고려해 볼 수 있다. (국내 연구자들에게 타 분야에 비해 상대적으로 주목 받고 있지 못하는 분야로 판단되어 본 고찰에서 다루어 보고자 한다.) 극심한 재난은 2011년 3월 11일 이웃나라인 일본 도후쿠 지방 태평양해역에서 발생한 대지진과 이어진 쓰나미 피해를 통해 그 심각성을 생생히 인식할 수 있었다. 이러한 재난 상황에서 더 심각한 도전은 재난복구를 위해 필요한 식수와 전기를 적시에 안정적으로 공급하는 문제이다. 광범위한 지역이 재난의 피해를 입음으로 관련 인프라가 모두 파괴되어 복구에 상당한 시간이 소요되는 상황에서 필수 생존 물품과 환경보존장비의 지원은 육상이나 해상 그리고 항공을 통해서도 쉽지 않다. 육로와 해로는 쓰나미로 인한 인프라 파손으로 접근이 불가능하고 항공을 통한 지원은 활주로의 확보가 불가능하므로 고정익기 보다는 회전익기(헬리콥터)가 고려될 수 있다. 이 경우 무거운 무게를 감당할 수 있는 헬리콥터를 다수 활용 할 수 있다면 물자의 보급과 지원이 가능할 것이다. 추가적인 문제점은 식수와 전기등을 공급할 수 있기 위해서는 이동형 수처리장비 및 발전기가 헬리콥터로 이동이 가능한 적절한 무게와 부피로 맞춤형제작이 되어 있어야 한다는 점이다. 마지막으로 이러한 생명유지 장비에 필요한 연료를 포함한 에너지원의 공급이다. 이 또한 재난 환경에 맞게 개발되어 있어야 할 것이다. 특히, 수처리 장비의 경우 재난지역 주변의 오염된 물을 식수로 변환할 수 있는 기술을 함께 갖추어야 할 것이다. 따라서 재난환경에서는 사전에 수 처리 장비, 발전기, 에너지시스템 및 연료공급 장비 등이 헬리콥터와 같이 고정 활주로를 필요로 하지 않는 수송시스템으로 이송이 가능한 무게와 부피로 최적화 시켜야만 하는 융합연구가 절대적으로 필요하다. 즉, 시스템적인 접근방법과 체계개발이 필수적이다. 더불어 사업화를 정당화하기 위해서는 상업성보다는 공익성이 우선되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 극한 환경 기술의 산업화에 대한 성급한 기대보다는 장기적인 파급효과를 통해 산업화에 기여하도록 견인하는 전략이 필요하다.



그림 10. 이동식 태양광 발전기(Solar Trailer)(출처: OkSolar)



그림 11. 이동식 대용량 발전기(Mobile Power Plant)(출처: GE)



그림 12. 이동식 수처리 시스템(Mobile Water Treatment System)(출처: GE)



그림 13. 세계에서 가장 큰 비행체-유효하중 도량 10톤(하이브리드 비행체)
World Biggest Aircraft - Payload Capacity up to 10 ton (Hybrid Air Vehicles)

3. 융합연구 추진방향

앞서 고찰을 통해 극한 환경은 잘 알려진바와 같이 극심한 우주환경과 같이 절대적 극한조건들과 더불어 생명체의 존속과 관련한 상대적이고 지속성에 대한 도전으로 그 범위가 매우 광범위함을 알 수 있다. 더불어 상대적으로 간과되고 있는 재난환경에 대한 관심과 관련 기술개발이 필요하다.

극한 환경에서도 생명/자원, 기계/수송, 동력/에너지 시스템 등이 지속 가능하도록 다양한 극한 환경 극복기술의 개발 및 확보는 국가 핵심 역량으로 필수적이다. 다만, 이러한 노력들이 성과를 도출하고 미래 고부가치 산업으로 자리 잡는 데는 기존에 진행중인 연구들의 통합 노력을 통한 체계구축이 필요하다. 즉, 산업화를 위해서는 국내에서 수행중인 분야별 기술개발과 더불어 시스템적인 접근 방법이 병행하여 추진되어야 한다. 시스템개발을 위해서는 기 개발된 기술의 최적화를 통한 재창조 및 활용을 목표로 하고, 애로기술들은 분야별 기술개발을 통해 신기술을 확보하는 두가지 방향으로 추진이 가능하다.

선진국들에 의해 선점되어 있는 극한 환경 기술분야에서 성과를 달성하기 위해 전략적인 접근이 필요할 것이다. 이를 위해, 극한환경을 극복해야 하는 핵심 시스템(체계)을 크게 세가지, (1) 생명/자원체계, (2) 기계/수송체계, (3) 전자/통신체계로 구분하고 이러한 시스템(체계)들이 극한 환경에서 안정성과 신뢰성을 가지고 구현될 수 있도록 기여할 수 있는 공통핵심기술들(Key Enabling Technologies)을 (가) 소재/제조, (나) 측정/제어, 그리고 (다) 동력/에너지 기술로 구분하여 추진할 필요가 있다. 예를 들어 고온환경을 극복하는 기술로서 소재와 냉각 기술들을 고려할 수 있는데 이러한 기술들이 시스템으로 구현되는데는 제조, 측정/제어 및 동력/에너지 기술들이 종합적으로 융합되어야 한다. 따라서, 세가지 핵심 시스템들이 노출될 수 있는 극한환경 조건들을 도출하고, 이를 극복할 수 있는 공통핵심기술(Key Enabling Technology)을 개발하는데 역량을 집중할 필요가 있다.

이를 위해서, 국내에서 진행중인 기술개발 활동들간의 교류를 촉진하고, 더불어 핵심 시스템 별 요구조건들을 도출하는 작업을 체계적으로 수행하여, 공통핵심기술들을 발굴해 나간다면 선진국들과의 격차에도 불구하고 효과적인 기술확보 및 선도가 가능할 것이라고 판단된다.



그림 14. 극한환경 극복기술 개발 체계

손창민 (Son Chang Min)



학 력

- University of Oxford Engineering Science 박사
- 부산대학교 기계공학과 석사
- 부산대학교 기계공학과 학사

경 력

- 現) 부산대학교 기계공학부 교수
- 前) Rolls-Royce plc. Strategic Research Centre 연구팀장
- 前) 한국항공우주연구원 선임연구원

참고문헌

1. Chatelier, H. L., & Boudouard, O., "High-Temperature Measurements", John Wiley & Sons, 1901
2. Zemansky, M. W., "Temperatures Very Low and Very High", Dover Publications, 1964
3. Ulmer, G. C., "Research Techniques for High Pressure and High Temperature", Springer-Verlag, 1971
4. 성낙환, "극한 환경 기술에서 찾는 우리의 미래", 엘지경제연구원, 2011
5. Clatterbaugh, G. V., Trethewey Jr, B. R., Roberts, J. C., Ling, S. X., & Dehghani, M. M., "Engineering System for Extreme Environment Technology", John Hopkins University Applied Physics Laboratory Technical Digest Vol. 29, No. 4, 2011
6. US Department of Energy, "Energy Frontier Research Centers - One Page Overviews", 2014

국가 R&D 현황 분석

최근 3년간(2011~2013년) 극한환경기술과 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

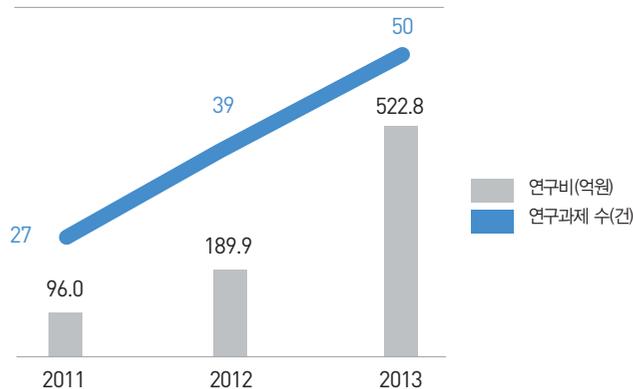
| 과제 선별 기준 |

연구요약문 내 (극한 환경) or (극한환경) 으로 검색

분석 결과 최근 3년간 총 116건의 과제에 808.7억원의 연구비가 투자됨

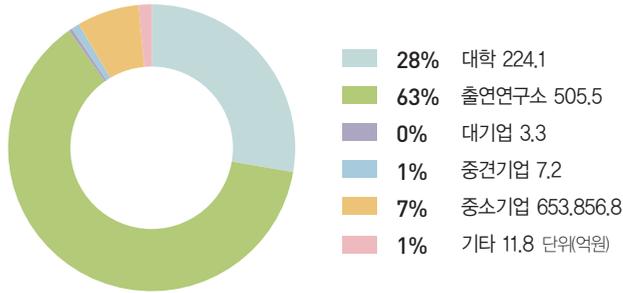
- 극한환경기술에 대한 관심의 증가와 비례하여 연구비와 과제수 모두 꾸준히 증가하는 것으로 나타남
- 하지만 최근 전도성 폴리머에 대한 전세계적인 관심과 식량산업의 시장 규모를 고려해 보았을 때 전체적인 전도성 폴리머에 대한 연구비 규모가 충분치 않은 것으로 사료됨

연도별 연구비와
연구과제 건수



연구수행주체 대학과 출연연구소를 중심으로 다양한 연구를 수행하고 있는 것으로 나타남

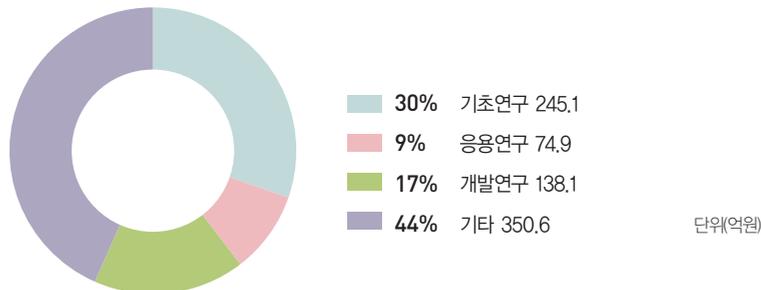
- 대학의 경우 71건의 과제에 224억원의 연구비로 다양한 주제의 연구를 하고 있는 것으로 나타났으며, 출연 연구소의 경우에도 한국해양연구원, 한국기계연구원, 한국건설기술연구원 등 다양한 기관에서 다양한 연구를 수행하고 있는 것으로 나타남
- 일부 기업에서도 극한 환경에서의 제품 활용을 위한 부품 국산화, 제품 신뢰성 테스트 등을 위한 연구 개발이 일부 이루어지고 있는 것으로 나타남



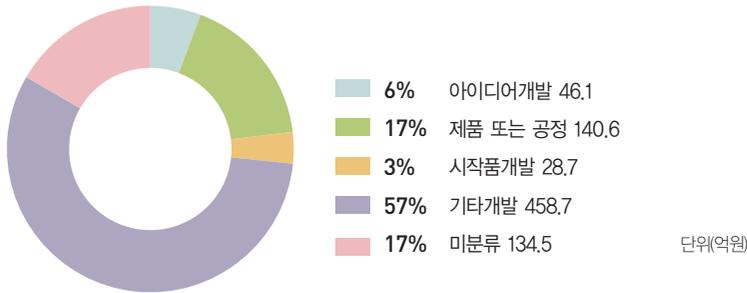
연구수준 극한환경기술의 특성상 다양한 수준의 연구개발이 이루어지고 있는 것으로 나타남

- 개발단계별로는 기초연구가 63건 245억원으로 가장 높게 나타났으나, 응용(74.9억원, 15건), 개발연구(138.1억원, 34건)도 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남
- 연구개발성격 측면에서는 극한환경기술이 실질적으로 적용될 수 있는 연구개발 위주로 이루어진다는 것을 보여주듯이 기타개발(458.7억원, 36건) 및 제품 또는 공정 연구(140.6억원, 31건) 중심의 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
- 기술수명주기적 측면에서는 도입기(516.3억원, 47건)가 대다수를 차지하였으며, 일부 성장기(185억원, 46건)로 보고 있는 연구개발분야도 상당수 되는 것으로 나타남

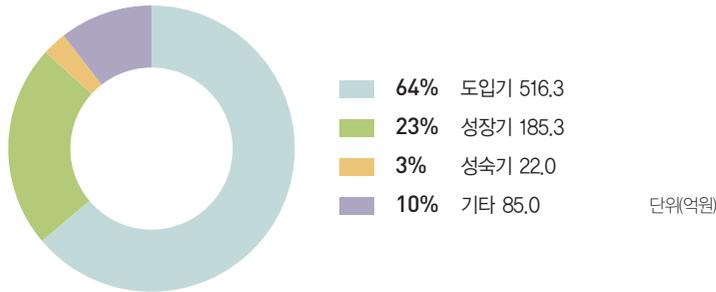
연구개발단계



연구개발성격

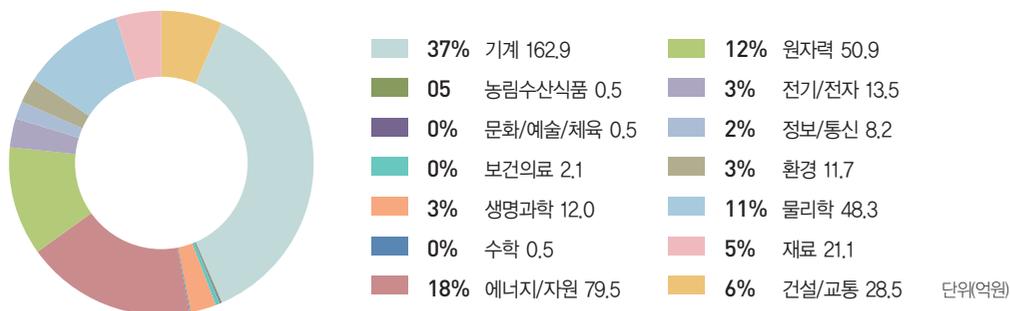


기술수명주기

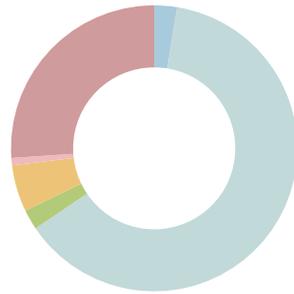


연구분야 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 특정 분야에 종속되지 않고 다양한 분야에서 활발한 연구가 이루어지는 융합연구의 특성을 보이고 있는 것으로 나타남

연구분야[국가과학기술표준분류]



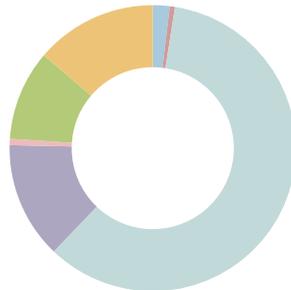
연구분야 [6T]



63%	ET	509.3
2%	IT	18.4
5%	NT	42.7
1%	ST	6.7
26%	포함되지 않음	210.8
3%	BT	20.3
0%	CT	0.5

단위(억원)

연구분야 [NTRM]



60%	환경/에너지 프론티어 진흥	482.4
13%	기반주력산업 가치창출	106.7
1%	국가안전 및 위상 제고	5.8
10%	기반주력산업 가치창출	106.7
14%	기타	111.2
2%	정보/지식/지능화 사회 구현	15.4
0%	건강한 생명사회 지향	4.8

단위(억원)

- 기계(163억원, 30건)와 에너지/자원(79.5억원, 11건) 분야를 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타났으나,
 - 문화/예술/체육, 보건의료, 수학, 건설/교통 등 크게 관련성이 높아보이지 않는 다양한 분야에서도 극한환경기술을 활용하거나 연구하기 위한 과제들이 존재하는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 극한 환경기술이 다양한 분야간의 융합을 통해 이루어지는 연구분야임을 알 수 있음
- 6T 기준에서 또한 일부 기술에 국한되는 것이 아닌 모든 6T 분야에 대하여 다양하게 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
 - 연구비상의 편차는 존재하지만 모든 6T 분야에서 연구가 이루어지고 있다는 사실은 극한환경기술의 높은 파급성을 보여주는 것이라 생각됨
 - NTRM 분석 결과에서 또한 환경/에너지 프론티어 진흥이 가장 높은 비중(60%)을 차지하는 것으로 나타나는 하였으나 모든 분야에 걸쳐 활발한 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 t. 02-958-4984