

2024-17호 (2024.4.29.)

R&D BRIEF

전자약

기초연구본부 선정 R&D 이슈 연구동향

ICT · 융합연구단 성과분석위원회



1 전자약이란?

- 전자약은 전자(electronic)와 약(pharmaceutical)의 합성어로, 전류나 자기장 등 에너지로 뇌 또는 신경 기능을 자극해 치료 효과를 내는 의료기기를 뜻함.¹⁾ 전자약은 치료가 필요한 신경을 직접 자극하기 때문에 약물처럼 혈관을 통해서 몸 전체로 전달되지 않으며, 따라서 부작용 위험을 덜고, 음식물 섭취 능력과 무관하게 사용 가능함.²⁾ 또 정보기술(IT) 도움으로 실시간 측정 및 자극이 가능해 증상에 더욱 더 빠른 대처가 가능함.³⁾
- 전자약은 심장박동조절기, 파킨슨 병이나 뇌전증 완화를 위한 뇌심부자극기 등과 같이 오래전부터 사용되어 왔음. 최근에는 우울증, 주의력결핍과잉행동장애(ADHD), 관절염, 편두통, 안구건조증 완화 등 새로운 응용처들이 나오면서 전자약 시장이 급속히 커지고 있음.

2 전자약 종류는?

- 전자약은 체내에 삽입되는 침습형(이식형), 체외 또는 피부에 붙여서 자극하는 비침습형 전자약으로 구분할 수 있음.
- 침습형 전자약: 체내에 삽입되어 특정 부위를 자극하는 것으로써 예를 들어, 심장 박동조절기는 심장의 전기적 활동을 감지하고 필요할 때마다 전기 자극을 주어 심장 박동을 조절함.⁴⁾ 파킨슨병이나 뇌전증 완화를 위한 뇌심부 자극기는 뇌의 특정 부위에 전극을 삽입하고 외부에서 제어하는 기기로, 이상한 신호를 보내는 뇌 부위를 차단하거나 정상적인 신호를 보내도록 자극함.⁵⁾



그림 1. 에너지원, 성질과 응용 분야별로 구분된 착용형 및 이식형 전자약 전체 개요 그림 6)

○ 비침습형 전자약: 체외에서 특정 부위를 자극하는 전자약을 말하며 사용하는 에너지원에 따라 다음과 같이 분류됨.

- 전기 전자약: 전기 자극을 통해 신경을 활성화하거나 억제하는 방식임. 예를 들어, 우울증 치료용 전자약 '마인드스팀'은 머리에 쓰는 밴드 형태의 제품으로, 전기 자극을 통해 우울증을 치료하며 '21년 4월에 식약처 시판 허가를 받았음.⁷⁾ 주의력결핍과잉행동장애(ADHD) 치료용 전자약 '모나크'는 귀에 붙이는 패치 형태의 제품으로, 전자 패치를 활용해 뇌 신경을 자극해 ADHD를 치료하며 FDA에서 승인받은 최초의 ADHD 치료용 전자약임.⁸⁾ 관절염 치료용 전자약 '쿠엔타'는 손목에 착용하는 팔찌 형태의 제품으로, 관절염으로 인한 염증과 통증을 줄이기 위해 신경계와 면역계를 조절하는 기능을 함.
- 자기 전자약: 자기장을 통해 신경을 자극하거나 조절하는 방식임. 예를 들어, 만성 통증 치료용 전자약 '탈렌트프로'는 전도 전자기 코일로 강력한 전류를 발생시켜 생성된 자기장을 신체에 통과시켜 근육과 신경세포를 활성화하는 기기임. 뇌전증 치료용 전자약 '네우로파이스'는 두개골 외부에 부착되는 자석으로 뇌의 특정 부위에 자기장을 가하여 발작을 예방하거나 완화하는 기기임.
- 초음파 전자약: 초음파를 통해 신경을 자극하거나 조절하는 방식임. 예를 들어, 우울증 치료용 전자약 '네우로스타'는 두개골 외부에서 초음파를 이용해 뇌의 우울증과 관련된 부위를 자극하는 기기임. 알츠하이머 치료용 전자약 '네우로레그너렉스'는 초음파와 마이크로 버블을 이용해 혈뇌장벽을 일시적으로 열어 뇌에 약물을 효과적으로 전달하는 기기임.

- 광 전자약: 광을 통해 신경을 활성화하거나 억제하는 방식임. 예를 들어, 파킨슨병 치료용 전자약 '옵토젠'은 유전자 변형된 뉴런에 파란색 빛을 비추어 도파민 분비를 증가시키는 기술임. 간질 치료용 전자약 '옵토스탑'은 유전자 변형된 뉴런에 노란색 빛을 비추어 발작을 억제하는 기술임.

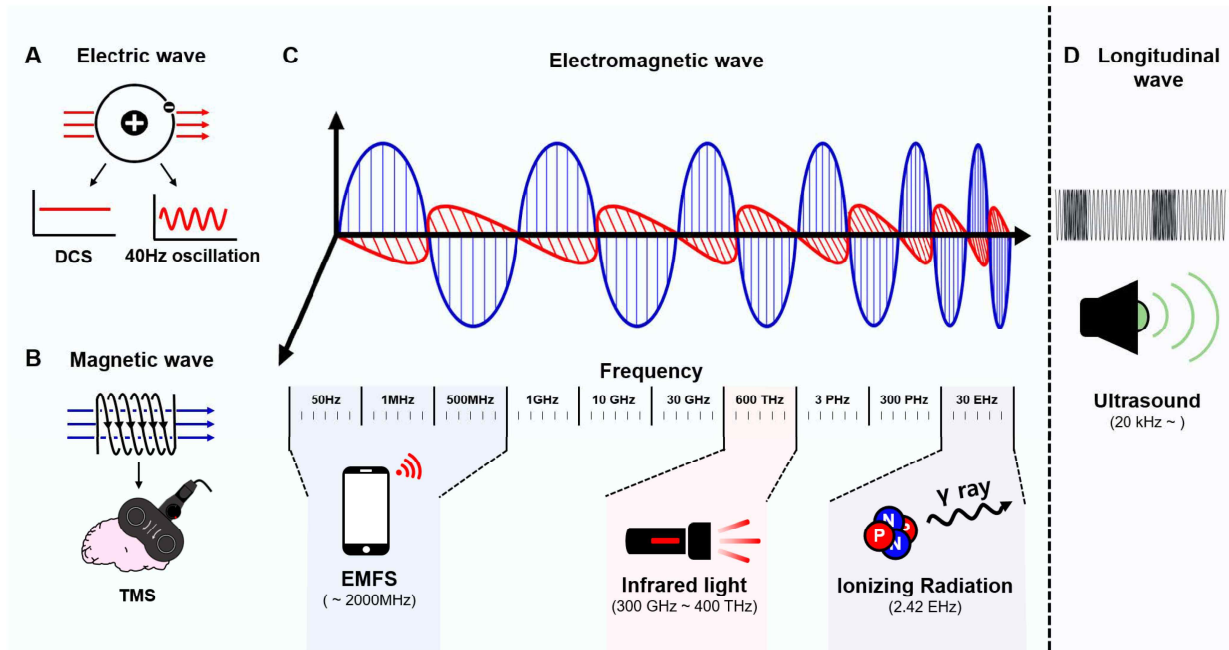
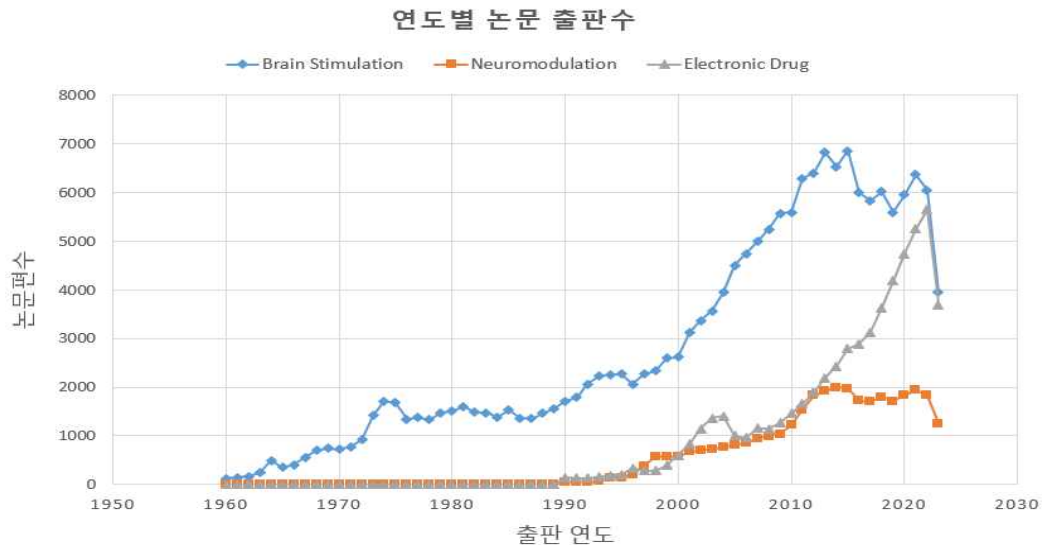


그림 2. 치매 치료에 시도되고 있는 비침습적 전자약에 사용되는 에너지원에 대한 개요
A 전기파, B 자기파, C 전자기파, D 초음파 9)

3 최근 많은 연구가 이루어지고 있나?

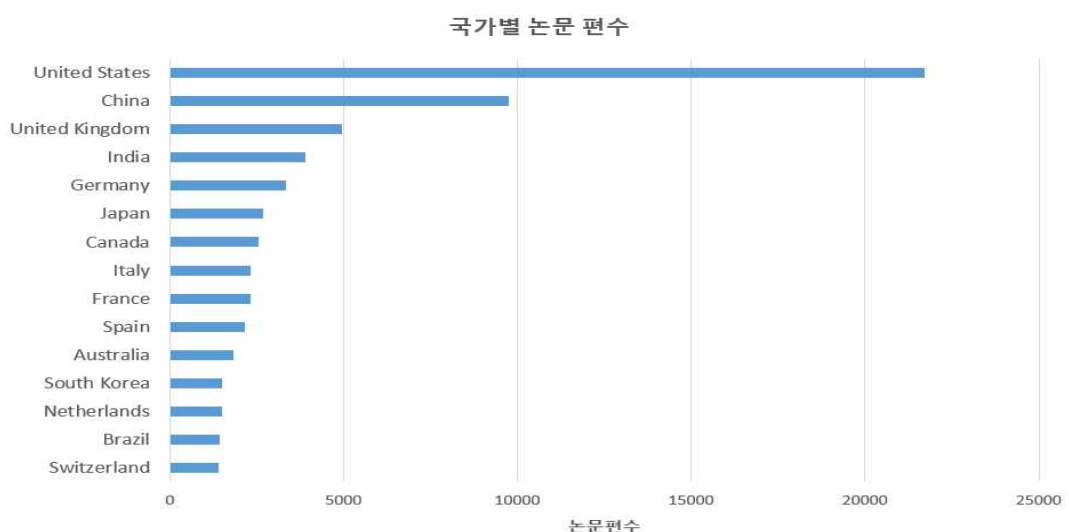
- 전 세계 우수 학술논문 검색 사이트인 scopus.com에서 키워드 “brain stimulation”, “neuromodulation”, “electronic drug”로 검색하고 검색 범위를 “article”과 “conference paper”로 제한하였을 때 연도별 검색 항목 수의 추이는 아래 그림과 같음. 아래 그림을 보면 뇌 자극(brain stimulation)이라는 키워드는 이미 1960년대부터 사용되기 시작했으나 뇌 조절(neuromodulation), 전자약(electronic drug)과 같은 키워드는 90년대 중반 이후에서야 사용되기 시작한 것을 알 수 있음. 또한, 아래 그림에는 포함시키지 않았으나 전자약(electroceutical) 키워드로 검색했을 경우 2014년도에 3편이 출판된 이후 22년도에 19편이 출판되어 논문 편수만 고려했을 경우 상대적으로 electronic drug이 electroceutical 용어보다 더 많이 사용되는 것을 알 수 있음.



- 논문 증가 추이는 아래 표에서와 같이 2011년 이후 현재까지 brain stimulation이나 neuromodulation의 경우 매년 비슷한 편수를 보이거나 electronic drug의 경우 2011년 대비 2022년에는 3배 증가한 것을 알 수 있음.

구분	2011~ 2012년	2013~ 2014년	2015~ 2016년	2017~ 2018년	2019~ 2020년	2021~ 2022년
Brain stimulation	12697	13357	12851	11848	11545	12421
Neuromodulation	3378	3917	3701	3502	3553	3774
Electronic Drug	3555	4627	5690	6757	8927	10908

- 또한, 국가별로 electronic drug 키워드를 가진 논문 편수를 분석했을 경우 미국이 2만여 편으로 가장 많이 출판하였으며 이어 중국, 영국, 인도, 독일 순이며 한국은 1,500여 편으로 12위를 차지하고 있는 것을 알 수 있음.



○ 전자약 국내동향

- 한국과학기술연구원(KIST)은 전자약의 기초 연구부터 임상 응용까지 다양한 분야에서 선도적인 연구를 수행하고 있음. 예를 들어, KIST는 신경정신질환, 비만, 류마티스 관절염과 같은 자가면역질환, 치매, 암, 파킨슨병 등의 난치병을 치료하기 위한 전자약 기술 개발을 진행하고 있음. KIST는 또한 전자약의 안전성과 효능을 평가하기 위한 동물실험 및 임상시험을 수행하고 있으며, 국내외 의료기관과 협력하여 다양한 환자군에게 전자약을 적용하고 있음.
- 한국생명공학연구원(KRIBB)은 합성생물학과 마이크로바이옴 연구를 통해 차세대 의료용 미생물 개발을 추진하고 있음. KRIBB는 인체와 미생물 간의 상호작용을 유전체학, 대사체학, 시스템생물학, 합성생물학 등에 기반하여 연구하고 있으며, 특정 질병을 진단하고 치료할 수 있는 차세대 의료용 미생물 개발을 목표로 하고 있음. KRIBB는 또한 미생물을 활용한 전자약 개발에도 관심을 갖고 있으며, 미생물의 유전자를 조작하여 전기 신호를 발생시키거나 감지하는 기능을 부여하는 연구를 수행하고 있음.
- 한국전자통신연구원(ETRI)은 전자약의 기술 동향과 시장 분석을 통해 전자약의 발전 가능성과 전략을 제시하고 있음. ETRI는 전자약의 정의, 원리, 종류, 응용 예, 기술 요구사항, 글로벌 연구 및 시장 동향, 전망 등에 대해 체계적으로 분석하고 있으며, 전자약의 산업화를 위한 정책적 제언을 제공하고 있음. ETRI는 또한 전자약과 관련된 특허 동향과 기술 수준을 분석하고 있으며, 국내 연구 개발의 현황과 과제를 파악하고 있음.

○ 전자약 해외동향

- 미국: 미국은 전자약 분야에서 선도적인 역할을 하고 있음. 2013년 글락소스미스클라인(GSK)은 전기 신호를 통한 치료기기에 대해 전자약이라는 용어를 처음 사용한 뒤 이 분야에 뛰어들었음. 2016년 구글과 합작사를 세워 2023년까지 7억 1500만 달러(약 8200억 원)를 투자해 류머티즘 관절염을 치료하기 위한 전자약을 개발하기로 했음. 미국식품의약국(FDA)은 지금까지 전자약 10여 종 이상 품목허가를 내줬음. 지난해 5월 미국 전자약 전문 업체 노보큐어는 기존 항암제와 병용하는 뇌종양 치료 전자약을 개발해 FDA에서 허가를 받았음. 미국 인스파이어메디컬시스템은 수면무호흡증 환자를 위한 제품으로 FDA 허가를 받는 등 전자약 활용 분야가 확대되고 있음.
- 유럽: 유럽은 전자약의 임상시험과 상용화에 앞장서고 있음. 유럽연합(EU)은 전자약의 임상시험을 지원하기 위해 2014년부터 2020년까지 8억 유로(약 1조 원)의 예산을 투입하였음. 유럽의료기기규정(MDR)에 따라 전자약은 의료기기로 분류되어 품목허가를 받기 쉬운 편임. 유럽에서는 다양한 전자약 제품이 상용화되고 있음. 예를 들어, 네덜란드의 메디엘라는 회사는 뇌전증 치료용 전자약 '네우로파이스'를 개발해 유럽에서 판매하고 있음. 이 제품은 두개골 외부에 부착되는 자석으로 뇌의 특정 부위에 자기장을 가하여 발작을 예방하거나 완화하는 기능을 함. 프랑스의 네우로스타는 우울증 치료용 전자약 '네우로스타'를 개발해 유럽과 미국에서 판매하고 있음. 이 제품은 두개골 외부에서 초음파를 이용해 뇌의 우울증과 관련된 부위를 자극하는 기능을 가지고 있음.

- 아시아: 아시아도 전자약의 연구개발과 시장 진입에 적극적으로 나서고 있음. 중국은 전자약의 연구개발에 많은 투자를 하고 있으며, 다수의 전자약 제품을 개발하고 있음. 예를 들어, 중국의 신경전자학연구소는 뇌전증 치료용 전자약 '신경전자학'을 개발해 중국에서 판매하고 있음. 이 제품은 뇌의 특정 부위에 전극을 삽입하고 외부에서 제어하는 기기로, 이상한 신호를 보내는 뇌 부위를 차단하거나 정상적인 신호를 보내도록 자극함. 일본도 전자약의 시장 진입에 적극적으로 나서고 있으며 메디코스히라타는 비만 치료용 전자약 '메디코스'를 개발해 일본에서 판매하고 있음. 이 제품은 전기로 신경 전달 신호를 억제해 식욕을 차단하는 기능을 함.

○ 전자약 시장

- 국내: 국내 전자약 시장은 아직 초기 단계에 있음.
한국과학기술연구원(KIST), 한국생명공학연구원(KRIBB), 한국전자통신연구원(ETRI) 등 국내 연구기관들은 전자약의 기초 연구부터 임상 응용까지 다양한 분야에서 선도적인 연구를 수행하고 있음. 하지만 시장 규모, 의료 분쟁 가능성으로 대기업들의 본격적인 시장 진출은 아직 가시화되지 않아 해외 거대 기업들과의 경쟁이 여의치 않음. 현재 위험이 덜한 침습형 전자약을 위주로 스타트업들이 고군분투 중임. 기술이 고도화된 우리에게도 새로운 기회가 될 수 있기 때문에 정부와 기업 중심으로 연구개발(R&D) 투자가 중요한 상황임.
- 세계: 글로벌 전자약 시장은 2020년 역 25조원에서 매년 7.2% 성장, 2030년에는 약 51조원 규모가 될 것으로 예상됨. 이 가운데 침습형과 비침습형 전자약 시장이 6대 4 정도의 비율을 차지하고 있음. 세계 전자약 시장은 미국과 유럽이 주도하고 있음. 시장조사기관 Report&Data는 전 세계 전자약 시장 규모가 2019년에 211.8억 달러, 2019년과 2027년 사이에 연간 7.67% 성장해 2027년에는 367억 달러를 기록할 것으로 예측함. 한편 IDTechEx는 전자약 시장이 매년 10% 이상 성장해, 오는 2029년에 600억 달러(한화 71조 600억원) 규모로 성장할 것으로 전망했음. 10년 만에 약 세배 가까이 성장하는 셈임.¹⁰⁾

5 기초연구사업 지원 현황은?

※ 연관 키워드: 전자약(Electronic drug), 뇌조절(Neuromodulation), 뇌자극(Brain stimulation) 등 관련 키워드를 이용해 검색

○ 지원과제 현황

전자약 관련 지원 과제 현황은 2021년까지 지원 과제 수 및 지원 연구비가 증가하였으며, 그 이후에는 비슷한 규모로 지원되고 있음.

구분	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
최초 선정과제수(건) ¹⁾	2	12	7	7	9	12	6	1
지원과제수(건) ²⁾	0	15	20	23	22	29	27	23
지원액(백만원)	297	3962	1466	1952	5332	2960	1636	194

¹⁾ 최초로 과제가 선정된 연도를 기준으로 한 건수(다년 과제는 선정연도를 기준으로 작성)

²⁾ 당해연도에 수행된 모든 과제 건수(다년 과제는 수행연도별로 중복 포함)

○ 선별한 지원과제 리스트

※ 연구사업통합지원시스템(e-R&D)에서 ‘전자약,’ ‘뇌조절,’ ‘뇌자극,’ 키워드 검색 후 전문가 검토를 통해 추출한 주요 지원과제 목록은 다음과 같고, 과제 목록은 세부 연구 분야로 나누어서 나열함.

연구책임자	과제명	사업명	총 연구기간
○○○ 연세대학교	만성 신경병증성 통증에서 뇌 섭엽 피질의 신경조절을 통한 통증 통제 작용 기전 규명	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 한국과학기술원	수면 뇌파의 계측구조 이해 및 활용	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-28
○○○ 건국대학교	보상 예측 오차에서 외측 고삐핵-중뇌 도파민 뉴런 신경회로의 역할	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 한동대학교	파킨슨병의 신경생리학적 바이오마커 및 인공지능 뇌심부자극 시스템 연구	신진연구지원 사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 대덕과학기술 사회적협동조합	고해상도 뇌파 및 개인맞춤형 비침습적 뇌 자극술을 이용한 정서적 공감 뇌 활성 피턴의 저장과 이에 기반한 공감반응 유발 연구	전략공모	2017-11-01~ 2018-10-31
○○○ 서울대학교	뇌자극을 통한 인간 촉각각에 대한 확장/축소/변조 기술 및 청각 정보 등의 다른 감각 정보를 촉각각 정보로 변환하는 기술 개발	전략공모	2017-05-01~ 2018-04-30
○○○ 연세대학교	자기통제능력을 향상시키는 신경회로망 강화를 위한 통합적 의식이론 확립	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 한국과학기술 연구원	초음파 자극 기반의 뇌회로 및 기전연구를 위한 초음파 트랜스듀서가 집적된 미세전극 어레이 시스템 개발	기초연구기반 구축사업	2017-11-01~ 2018-10-31
○○○ 광주과학기술원	수면 조절을 위한 뇌 전기 자극 피드백 기법 개발-신경회로를 이용한 멀티스케일 계산 모델링	이공학 개인기초연구 지원사업	2018-06-01~ 2021-05-31
○○○ 고려대학교	외집단 구성원에 대한 공감 편향의 측정 및 비침습적 뇌자극을 이용한 공감 편향의 감소 방안 연구-다문화 사회와 약자혐오의 맥락에서	전략공모	2018-11-01~ 2019-10-31
○○○ 이화여자대학교	외상/스트레스 노출 이후 인지저하에서 인지훈련-비침습적 뇌자극 동시적용의 인지기능 개선 효과 및 뇌 기전 규명: 유전자-뇌영상 연구	중견연구자 지원사업	2019-09-01~ 2022-02-28
○○○ 가톨릭관동 대학교	신경세포 종류별 선택적 자극이 가능한 비침습적 뇌자극 기전연구	중견연구자 지원사업	2019-09-01~ 2022-02-28
○○○ 충남대학교	비침습적 뇌자극이 시청각 반응 및 뇌신경활성에 미치는 영향	재도약연구	2019-09-01~ 2022-02-29
○○○ 인하대학교	난치성 신경질환을 위한 비침습적 전기 자극의 영향	학문균형발전 지원사업	2019-06-01~ 2022-05-31

연구책임자	과제명	사업명	총 연구기간
○○○ 고려대학교	분노-공격행동 조절기능 증진을 위한 뇌자극-공감훈련 양상블테라피 시스템 개발	중견연구자 지원사업	2020-03-01~ 2024-02-29
○○○ 서울대학교	정밀한 다이나믹 체성감각 유발을 위한 시공간적 전기장 제어 기반 침습적 뇌자극 연구	기초연구기반 구축사업	2020-09-01~ 2021-08-31
○○○ 서울대학교 (연건캠퍼스)	뇌 자극을 활용한 인간 체성감각 인지 변조	기초연구기반 구축사업	2020-06-01~ 2022-05-31
○○○ 고려대학교	머신러닝 기술 접목을 통한 파킨슨병 위험도 산출 기술 개발 및 비침습적 자극을 통한 증상 개선 연구	기본연구	2020-06-01~ 2023-02-28
○○○ 이화여자대학교	뇌 자극 치료의 최적화를 위한 개인맞춤형 뇌 네트워크 모델 기반 인실리코 연구	학문균형발전 지원사업	2020-06-01~ 2023-05-31
○○○ 이화여자대학교	이화여자대학교 뇌융합과학연구원	기초연구기반 구축사업	2020-06-01~ 2023-05-31
○○○ 서울대학교병원	파킨슨병 환자의 뇌기능 연결망 분석에 기반한 비침습적 신경조절 치료기술 개발 및 검증	신진연구지원 사업	2020-03-01~ 2025-02-28
○○○ 한양대학교	전기화학 기반 뚜렛 증후군 스마트 폐루프 뇌심부자극기술 개발	중견연구자 지원사업	2021-10-31~ 2024-02-29
○○○ 대구경북과학 기술원부설 한국뇌연구원	중추신경계 세로토닌 활성화 표지자를 이용한 뇌전기자극 예후 예측 모델 개발	기초연구기반 구축사업	2021-09-01~ 2024-08-31
○○○ 한국과학기술 연구원	후각 기억 뇌회로 기반의 인공 후각 자극 시스템 개발	기초연구기반 구축사업	2021-09-01~ 2024-08-31
○○○ 한양대학교	영장류에서의 뇌졸중 진단 및 치료를 위한 바이오마커 및 비침습적 뇌자극 기술 개발	기초연구기반 구축사업	2021-09-01~ 2024-08-31
○○○ 고려대학교	파킨슨병에 의한 뇌 백질 미세구조 변성의 관찰을 위한 심부 뇌와 주변 백질의 초고해상도 트랙밀도영상 연구	학문균형발전 지원사업	2021-06-01~ 2024-05-31
○○○ 연세대학교	인공 자기수용체 개발을 통한 세포 및 동물 활동 조절	중견연구자 지원사업	2021-09-01~ 2024-02-29
○○○ 이화여자대학교	만성 일측 측두엽 뇌전증 모델에서 항경련, 인지저하예방 및 정서 행동치료 위한 해마 국소신경망 광유전 신경조절치료기전 연구	기초연구기반 구축사업	2021-06-01~ 2023-05-31
○○○ 광주과학기술원	시간 간섭 뇌 전기 자극술의 효과 검증 및 자극 조건 최적화 전략 탐색-멀티스케일 모델링 사용	중견연구자 지원사업	2022-03-01~ 2024-02-29

연구책임자	과제명	사업명	총 연구기간
○○○ 이화여자대학교	해마 장소세포 공간 표상에서의 성상세포 역할 규명과 이에 기반한 심부뇌자극 기법 개발	중견연구자 지원사업	2022-03-01~ 2025-02-28
○○○ 계명대학교	알츠하이머 치료를 위한 인체 삽입형 바이오포토닉스 전자약 연구	학문균형발전 지원사업	2022-06-01~ 2027-05-31
○○○ 강릉아산병원	파킨슨 병에서의 딥러닝을 통한 MRI 해부학적 구조물 및 연결성 추상화 기반 뇌심부자극수술 수술목표설정 및 임상적용	신진연구지원 사업	2016-06-01~ 2019-05-31
○○○ 대구경북과학 기술원	배터리 없는 방광 신경자극기 개발 및 이를 이용한 신경인성 방광치료	신진연구지원 사업	2019-03-01~ 2022-02-28
○○○ 건국대학교	물 확산텐서와 결합된 세포내·외 전기적 특성 영상 분석	중견연구자 지원사업	2016-06-01~ 2019-05-31
○○○ 경희대학교	생체 전자장과 물성의 동시 측정법에 의한 뇌 전자기치료의 직접 영상화와 치료 효과 규명	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 고려대학교	오가노이드 기술 기반 뇌 질환 환자 맞춤형 초고밀도 분석 플레이트 개발	신진연구지원 사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 광주과학기술원	알츠하이머 동물 모델에서 뇌기능연결성 관찰 및 조절을 위한 뇌광학영상과 초음파 뇌자극 통합 시스템 개발	중견연구자 지원사업	2018-03-01~ 2021-02-28
○○○ 대구경북과학 기술원	차세대 뇌신경 축진을 위한 뇌활성 실시간 피드백 기반 무침습 중추-말초 신경 복합 자극 및 조절 기술 개발	중견연구자 지원사업	2018-03-01~ 2021-02-28
○○○ 연세대학교	뇌 심부 자극 및 초고해상도 뇌 신호 측정이 동시에 가능한 유연한 생체 삽입형 투명 디바이스 개발	기초연구기반 구축사업	2021-06-01~ 2023-05-31
○○○ 연세대학교	3차원 유연 생체전극 기반, 최소침습 및 장기적 뇌내 생체신호 감지 및 자극 시스템 개발	신진연구지원 사업	2021-03-01~ 2026-02-28
○○○ 고려대학교 세종캠퍼스	효율적인 뇌신경재활을 위한 뇌파를 이용한 인공지능 기반 뉴로네비게이션 알고리즘 최적화 및 임상 적용 효용성 검증	기초연구기반 구축사업	2022-06-01~ 2024-05-31
○○○ 대구경북과학 기술원	비침습 뇌파/뇌혈류 기반 인공지능을 활용한 통증의 대뇌 피질 네트워크 시각화 및 통증 치료에의 적용	중견연구자 지원사업	2023-03-01~ 2028-02-29
○○○ 경희대학교 (국제캠퍼스)	초음파/광파 동시 자극 기반 비침습 신경 인터페이스 기술 개발	중견연구자 지원사업	2017-03-01~ 2020-02-29
○○○ 인제대학교	뇌장벽 장기칩 (BBB organ-on-a-chip)을 이용한 질병모델링과 능동적 약물반응 연구	신진연구지원 사업	2018-09-01~ 2021-08-31

연구책임자	과제명	사업명	총 연구기간
○○○ 이화여자대학교	신경병증성 통증 치료를 위한 초소형 무선-무전원 페루프 기반 이식형 다채널 마이크로시스템의 개발	중견연구자 지원사업	2019-09-01~ 2022-02-28
○○○ 삼성서울병원	난치성 배뇨장애 치료를 위한 피드백 기반의 배뇨기능 제어 기술 개발	중견연구자 지원사업	2019-06-01~ 2022-02-28
○○○ 성균관대학교	초음파 뇌 자극 최적화를 위한 초음파 자극-동시 모니터링 기술 개발: 세포에서 소동물 생체 실험까지	중견연구자 지원사업	2020-03-01~ 2024-02-29
○○○ 부산대학교	고정밀 경두개전류자극기에 의한 도파민관련 뇌신경질환의 치료기술	중견연구자 지원사업	2021-03-01~ 2026-02-28
○○○ 대구경북첨단의료 산업진흥재단	신경계 재활을 위한 배터리가 필요 없는 지능형 인공전자 신경외피 개발	신진연구지원 사업	2021-03-01~ 2024-02-29
○○○ 연세대학교 (미래캠퍼스)	멀티모달 뇌영상, 뇌자극 및 뇌인지기능에 기반한 통증의 진단 및 치료법 연구	기본연구	2022-06-01~ 2025-02-28
○○○ 서울대학교	기억기능 향상을 위한 개인 맞춤형 뇌 자극 시스템 구축을 위한 연구	기초연구기반 구축사업	2018-09-01~ 2019-08-31
○○○ 고려대학교	시상 기반 뇌신호 분석을 통한 의식 연구	중견연구자 지원사업	2018-03-01~ 2021-02-28
○○○ 고려대학교	뇌기능영상 및 뇌자극 방법론을 이용한 우울 정서와 사회 의사결정 관련 두뇌 메커니즘 연구	학문균형발전 지원사업	2020-06-01~ 2023-05-31
○○○ 한양대학교	뇌이미징과 비침습적 뇌자극을 이용한 인간의 운동 학습과 기억의 뇌과학적 기전에 대한 연구	중견연구자 지원사업	2021-03-01~ 2025-02-28
○○○ 고려대학교	추간판 세포 공동 배양장치를 이용한 추간판 신경 내성장 기전 및 neuromodulation 기초융합 연구	이공학 개인기초연구 지원사업	2017-06-01~ 2020-05-31
○○○ 광주과학기술원	경두개 초음파 및 광 자극을 이용한 산발성 및 가족성 알츠하이머병 전자 신약 개발	중견연구자 지원사업	2022-03-01~ 2027-02-28

○ 기초연구사업 주요 연구 진행 상황 및 결과

경두개 초음파 및 광 자극을 이용한 산발성 및 가족성 알츠하이머병 전자 신약 개발¹¹⁾

<연구책임자>

- 김○○ (광주과학기술원)

<성과내용>

- 비타민 D의 결핍은 알츠하이머를 악화시킬 수 있는 요인 확인
 - 비타민 D의 결핍은 알츠하이머를 유발하는 아밀로이드 베타 수치를 높이고 기억력 저하를 유발을 확인함.
 - 비타민 D 결핍군에서 아밀로이드 베타 생산 관련 효소의 전사가 증가함. 그 결과로 아밀로이드 베타 증가와 기억력 저하가 나타남.
- 동물모델에서(마우스 실험) 치료 가능성 발견
 - 비타민 D를 보충했을 때 신경퇴행성 변화를 감소시킴을 확인함.
 - 아밀로이드 베타 감소 및 기억력 호전을 확인함.

만성 신경병증성 통증에서 뇌섬엽 피질의 신경조절을 통한 통증 통제 작용 기전 규명¹²⁾

<연구책임자>

- 이○○ (연세대학교)

<성과내용>

- 만성 통증 모델에서 mTORC1과 mTORC2 통증조절 기전 연구
 - mTORC 억제제를 사용한 실험군과 대조군의 통증 행동 변화를 비교 분석함.
 - mTORC1과 mTORC2을 통한 통증 조절의 기전 규명함.
 - Western blot을 이용한 mTORC 하위인자의 발현변화, 통증 모델에서 증가한 하위인자의 변화는 Torin 1과 XL388 주입 후 감소한 경향을 발견함.
 - 신경병증성 통증 모델에서 Torin 1과 XL388을 주입한 후의 통증관련 뇌 활성화 변화를 비교하였는데, 통증으로 유발된 뇌피질의 활성화도가 Torin 1과 XL388의 주입에 의해 억제되는 것을 관찰함.

배터리 없는 방광 신경 자극기 개발 및 이를 이용한 신경인성 방광치료¹³⁾

<연구책임자>

- 이○○ (대구경북과학기술원)

<성과내용>

- SME(Shape memory effect)를 사용하여 좌골신경의 가지, 부교감 골반신경과 같은 작은 신경에 쉽게 이식될 수 있는 SMP(Shape memory polymer) 중합체를 사용하여 DCNI(Double clip neural interface) 개발
- 방광의 배뇨 기능을 유도하는 삽입형 기계적 신경 자극기로 응용 가능함.
 - 인체에서 발생하는 기계적 운동에너지를 마찰에너지로 전환하는 소자를 개발하여 신경 자극기에 적용해 배터리 없는 신경 조절 인터페이스를 사용함.
 - 개발된 신경 조절 인터페이스는 방광 골반신경에 유연하게 삽입할 수 있고 불필요한 신경 자극을 방지하여 합병증의 위험을 줄일 수 있는 신경 자극기로 개발됨.

수면 뇌파의 계층구조 이해 및 활용¹⁴⁾

<연구책임자>

- 최○○ (한국과학기술연구원)

<성과내용>

- 만성 수면결핍 마우스에서 NREM 수면 중 수면 뇌파의 특징적 변화 분석
 - 수면 박탈 후 NREM 수면 중 델타파의 진폭 증가가 넓은 피질 영역에서 관찰됨.

- 만성 수면 박탈 모델에서 NREM 계층 구조의 변화 분석
- 만성 수면박탈 모델에서 NREM 뇌파의 주파수별 변화 분석
 - 수면 박탈 후 NREM 수면 중 넓은 영역에서 관찰된 델타파의 증가와 다른 주파수 간의 연관성을 분석함. 전두엽 델타파의 증가는 수면박탈 첫날 고점을 보임. 반면 빠른 주파수 성분은 수면 박탈 기간 동안 점진적으로 증가를 발견함.
- REM 수면 계층 구조 탐색을 위한 영역별 뇌파 분석
 - 주기성을 가진 뇌파는 전두엽에서만 특이적으로 증가하며 전두엽에서 주기성을 가진 뇌파 상태일 때 운동-감각 영역 피질에서 세타파의 진폭과 연결성이 증가함을 확인함.

알츠하이머 동물 모델에서 뇌기능연결성 관찰 및 조절을 위한 뇌광학영상과 초음파 뇌자극 통합 시스템 개발¹⁵⁾

<연구책임자>

- 김○○ (광주과학기술원)

<성과내용>

- 뇌졸중 동물 모델에서 신체적 움직임의 제약을 받지 않는 무선 wearable 뇌무선 자극기 시스템 개발
 - 저강도 집속초음파를 무선으로 조정하는 가벼운 wearable 뇌 자극기 개발
 - 뇌졸중 동물 모델에서 426 kPa 압력의 초음파를 이용하여 재활 3일(초음파를 가하지 않은 그룹)/ 초음파를 가한 그룹과 비교함.
 - 초음파를 가한 그룹에서 운동 능력이 향상됨을 확인하였고, 재활 7일 후에는 정상 쥐와 유사한 운동 능력을 보이는 것을 확인함.
 - 뇌 운동 영역 자극함으로써 뇌졸중으로 손상된 신경의 재활이 가능하다는 걸 증명함.

6 전자약 부작용?

- 전자약은 부작용이 없는 것처럼 보이지만, 사실은 그렇지 않음. 전자약도 인체에 영향을 주는 '약'이기 때문에 언제든지 부작용이 발생할 수 있음¹⁶⁾. 예를 들어, 전자약이 자극하는 부위와 인접한 부위에도 영향을 줄 수 있으며, 전자파나 자기장에 과민한 사람들은 피부나 신경에 자극이나 염증을 일으킬 수 있음. 또한, 전자약의 사용법이나 적응증이 환자의 상태와 맞지 않으면 효과가 없거나 역효과를 낼 수 있음.
- 전자약의 부작용을 최소화하려면, 안전성 검증 체계를 정비하고, 의사의 처방과 지시에 따라 사용해야 함. 전자약은 새로운 치료법이기 때문에 장기적인 효과와 안전성에 대한 연구가 아직 부족함. 따라서, 전자약을 사용할 때는 주의가 필요함.

7 향후 기초연구사업에서 어떤 연구들이 필요한가?

연구자 그룹 조사 결과 ※ 김○○ 교수 (GIST)	■ 전자약의 작용기전에 관한 연구 - 현재 전자약은 에너지원에 따라 전기, 자기, 초음파, 광, 혹은 소리와 같은 물리적 에너지를 사용하고 있음. 각각의 에너지원에 대해 어느 정도의 작용기전이 제시되고 있으나 여전히 밝혀야 할 부분들이 많이 있어 이에 관한 연구가 필요하다고 판단됨.
연구자 그룹 조사 결과 ※ 황○○ 교수 (DGIST)	■ 전자약의 안전성 검증 연구 - 전자약은 약물이 아니라 전기, 자기, 초음파, 그리고 광과 같은 물리적 에너지를 인체에 유해하지 않은 범위 내에서 사용하기 때문에 약물에 비해 부작용이 거의 없는 것으로 생각되지만, 의사의 처방이 있어야 하고 장기적으로 사용 시 안전성에 대한 검증이 꼭 필요하다고 생각됨.

8 기초연구사업 결과들이 원천기술 확보로 이어지려면?

연구자 조사 결과 ※ 안○○ 교수 (단국대)	■ 실패해도 괜찮은 기초연구 지원이 필요 - 최근에는 기초연구라고 하더라도 실용화를 강조하는 경우가 많음. 이에 따라 기초연구가 정말 기초라기보다는 개발 및 응용에 가까운 경우가 많음. - 원천기술 확보 비율을 높이기 위해서는 정말 기초연구를 수행할 수 있게 지원해주고 설사 실패하더라도 과감하게 새로운 것을 시도해 보고자 하는 과제를 지원해줘야 한다고 생각함. - 기초연구 과제의 성공 판단에 있어 논문은 당연히 주요한 지표이지만 그에 못지않게 원천기술에 대한 특허 확보도 매우 중요하다고 생각되고 특허의 가치를 확인 할 수 있는 특허가치평가 시스템의 도입이 요구되고 원천기술 특허 확보에 대해 가산점을 줘야 한다고 생각됨.
---	---

9 원천기술 확보를 위해 향후 중점적으로 추진하여야 할 연구주제는?

연구자 조사 결과 ※ 김○○ 교수 (GIST)	■ 필요에 따른 선택적 자극 기술 개발 - 필요에 따른 선택적 자극 기술의 개발은 신경과학, 의학, 그리고 바이오메디컬 엔지니어링 분야에서 중요한 연구 주제임. 특정 말초 신경 다발에서 특정 장기로 투사하는 신경을 선택적으로 자극하면 더욱 정밀한 치료나 연구가 가능함.¹⁷⁾ 예를 들어, 미주신경에서 횡장으로 보내는 신경 분지만 정밀하게 자극하면, 인슐린 분비 늘어 정밀한 혈당 조절에 활용될 수 있음. - 또한, 구심성 및 원심성 복합신경에 대한 선택적 자극을 고려할 때, 이는 특히 통증 관리나 신경 재생, 그리고 신경-근육 질환에 대한 치료에서 중요할 수 있음. 이러한 접근 방식은 특정 신경 경로만을 대상으로 하여 불필요한 부작용을 최소화하고 치료 효과를 높일 수 있음. - 기술적 측면에서, 오피토제네틱스, 전기자극, 초음파 자극 등 다양한 방법들이 선택적 자극에 사용될 수 있음. 오피토제네틱스는 특정 빛 파장에 반응하는 오피신을 신경세포에 발현시켜 매우 정밀한 자극이 가능하며¹⁸⁾, 전기자극은 이미 임상에서 널리 사용되고 있음. 초음파 자극은 비침습적 방법으로 최근 주목을 받고 있음.¹⁹⁾ - 이러한 기술 개발은 다양한 임상 시나리오에서 활용될 수 있으며, 기존의 치료 방법보다 훨씬 더 효율적이고 안전한 대안을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
--	--

연구자 조사 결과 ※ 임○○ 교수 (한양대)	■ 전자약 치료 조건 최적화 연구 – 여러 다양한 에너지를 사용하는 전자약의 경우 최고의 치료 효과를 얻기 위해서는 비임상 실험을 통해 넓은 범위의 자극 조건별 실험을 하고 결과 분석을 통해 최적의 치료 조건을 찾아가는 과정이 필요함. – 최적의 치료 조건을 찾아가는 과정에서 치료 효과가 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 이유를 밝히는 연구 또한 필요함. ■ 뇌 신호 분석을 통한 뇌 자극 효과 예측 기술 – 전자약을 이용해 다양한 뇌 질환에 적용하고자 할 때 실시간으로 뇌 자극에 대한 반응을 관찰하고 이를 통해 치료 효과를 예측할 수 있다면 좀 더 개인 최적화된 전자약 치료가 가능해질 것으로 예상되어 이에 관한 연구가 필요함.
--	---

참고 문헌

- 조지성, 이연경, 권보배, 김아름, 김엄지.(2022). 글로벌 공급망 리스크별 영향분석 및 대응방안 연구 - 에너지·곡물을 중심으로. [KMI] 연구보고서.
- Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120842.
- Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2004). Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan management review*.
- De Angelis, R., Howard, M., & Miemczyk, J. (2018). Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, 29(6), 425-437.
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344-357.
- Iftikhar, A., Purvis, L., & Giannoccaro, I. (2021). A meta-analytical review of antecedents and outcomes of firm resilience. *Journal of Business Research*, 135, 408-425.
- Lahri, V., Shaw, K., & Ishizaka, A. (2021). Sustainable supply chain network design problem: Using the integrated BWM, TOPSIS, possibilistic programming, and ϵ -constrained methods. *Expert Systems with Applications*, 168, 114373.
- Moheb-Alizadeh, H., Handfield, R., & Warsing, D. (2021). Efficient and sustainable closed-loop supply chain network design: A two-stage stochastic formulation with a hybrid solution methodology. *Journal of Cleaner Production*, 308, 127323.
- Rajesh, R. (2019). A fuzzy approach to analyzing the level of resilience in manufacturing supply chains. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 224-236.
- Rezaei, A., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2021). Supplier selection and order allocation model with disruption and environmental risks in centralized supply chain. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(6), 1036-1072.
- Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., & Nayeri, S. (2021). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107406.
- Sawik, T. (2022). Stochastic optimization of supply chain resilience under ripple effect: A COVID-19 pandemic related study. *Omega*, 109, 102596.
- Shen, Z. M., & Sun, Y. (2023). Strengthening supply chain resilience during COVID-19: A case study of JD. com. *Journal of Operations Management*, 69(3), 359-383.
- Yavari, M., & Ajalli, P. (2021). Suppliers' coalition strategy for green-Resilient supply chain network design. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38(3), 197-212.
- Zarbakhshnia, N., Kannan, D., Kiani Mavi, R., & Soleimani, H. (2020). A novel sustainable multi-objective optimization model for forward and reverse logistics system under demand uncertainty. *Annals of Operations Research*, 295, 843-880.

- 1) 전기 자극으로 병 고친다 전자약이 뭐길래 (매거진 한경 2021.10.15.)
- 2) 전자약의 현재와 미래 (전자신문 2023.4.27.)
- 3) 우울증 전자약 세계 첫 출시 (헬스조선 2023.04.28.)
- 4) 전자약 연구개발 동향, 전자통신동향분석 vol 35 No 3 98-110 (2020)
- 5) 약 대신 전기로 질병 치료 (조선일보 조선경제, 과학 2022.03.23.)
- 6) Advanced Science, Volume: 8, Issue: 8, First published: 19 February 2021, DOI: (10.1002/advs.202004023)
- 7) 전기 자극으로 병 고친다 전자약이 뭐길래 (매거진 한경 2021.10.15.)
- 8) 전자약 연구개발 동향, 전자통신동향분석 vol 35 No 3 pp. 98-110 (2020)
- 9) Int. J. Mol. Sci. 2023, 24(1), 679; <https://doi.org/10.3390/ijms24010679>
- 10) 전자약, 기존 약 대비 우월한 안전성 유효성 중요 (약업신문 2021.09.06.)
- 11) Kang, J., Park, M., Lee, E., Jung, J., & Kim, T. (2022). The Role of Vitamin D in Alzheimer's Disease: A Transcriptional Regulator of Amyloidopath and Gliopathy. *Biomedicines*, 10(8), 1824.
- 12) Kim, K., Choi, S., Cha, M., & Lee, B. H. (2020). Effects of mTOR inhibitors on neuropathic pain revealed by optical imaging of the insular cortex in rats. *Brain research*, 1733, 146720.
- 13) Cho, Y., Shin, H., Park, J., & Lee, S. (2021). Advanced neural interface toward bioelectronic medicine enabled by micro-patterned shape memory polymer. *Micromachines*, 12(6), 720.
- 14) Kim, B., Hwang, E., Strecker, R. E., Choi, J. H., & Kim, Y. (2020). Differential modulation of NREM sleep regulation and EEG topography by chronic sleep restriction in mice. *Scientific reports*, 10(1), 18.
- 15) Kim, E., Anguluan, E., Kum, J., Sanchez-Casanova, J., Park, T. Y., Kim, J. G., & Kim, H. (2020). Wearable transcranial ultrasound system for remote stimulation of freely moving animal. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(7), 2195-2202.
- 16) [ET시론] 전자약의 현재와 미래 (전자신문 2023.04.28.)
- 17) Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (Eds.). (2012). *Principles of neural science* (Vol. 5). New York: McGraw-hill.
- 18) Boyden, E. S., Zhang, F., Bamberg, E., Nagel, G., & Deisseroth, K. (2005). Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity. *Nature neuroscience*, 8(9), 1263-1268.
- 19) Tyler, W. J., Tufail, Y., Finsterwald, M., Tauchmann, M. L., Olson, E. J., & Majestic, C. (2008). Remote excitation of neuronal circuits using low-intensity, low-frequency ultrasound. *PLoS one*, 3(10), e3511

저자소개

| ICT·융합연구단 성과분석위원회

기초연구본부

본 브리프는 한국연구재단의 공식 의견이 아닌 집필진의 견해이며 동 내용을 인용 시 출처를 밝혀야 합니다.

NRF R&D BRIEF 2024-17호

전자약

기초연구본부 선정 R&D 이슈 연구동향

|발행일| 2024년 4월 29일

|발행인| 이 광 복

|발행처| 한국연구재단

본 원 : 대전광역시 유성구 가정로 201

서울청사 : 서울특별시 서초구 현릉로 25

<http://www.nrf.re.kr>

|편 집| 정책연구실 정책혁신팀