

KIT Energy News

Vol. 16

2024.10.15.

에너지융합기술 혁신인재 양성사업단

Innovative Education & Research Center for Energy Convergence Science and Technology

< 목 차 >

KIT Energy 소식

- 신소재공학부 박철민 교수 연구팀, ‘세계 최고 성능·우수한 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지’ 개발..... 1

에너지저장

- Empowering all-solid-state Li-ion batteries with self-stabilizing Sn-based anodes..... 3
- Design of Fluorinated Elastomeric Electrolyte for Solid-State Lithium Metal Batteries Operating at Low Temperature and High Voltage..... 4
- S@FeS₂ Core-Shell Cathode Nano material for Preventing Polysulfides Shuttling and Forming Solid Electrolyte Interphase in High-Rate Li-S Batteries..... 5
- Synthesis of a novel fluorinated polyimide for preparing thermally conductive polyimide composites..... 6

환경에너지

- Sonochemical oxidation activity in 20-kHz probe-type sonicator systems: The effects of probe positions and vessel sizes..... 7

수소에너지

- Synthesis of multifunctional Ti/RuO₂-ZnO composite catalytic electrodes for electrochemical oxidation and hydrogen production from toluene-containing wastewater..... 8

KIT Energy 소식

신소재공학부 박철민 교수 연구팀,
 ‘세계 최고 성능·우수한 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지’ 개발

- ‘세계 최고 성능·우수한 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지’ 개발
- ‘고에너지밀도, 우수한 사이클, 고안전성’ 통해 기존 전고체전지용 음극소재 한계 극복
- 에너지 분야 최정상급 국제 학술지 ‘줄(Joule)’표지 논문 선정

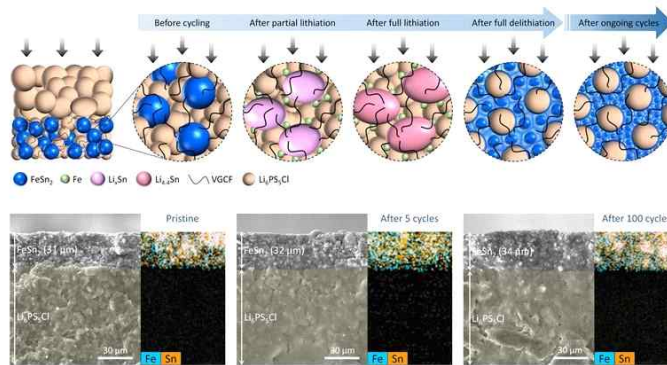


우리 대학 신소재공학부 전지신소재연구실(Advanced Battery Materials Lab.) 박철민 교수 연구팀이 ‘세계 최고 성능과 우수한 안전성을 갖춘 전고체전지 개발’에 성공했다.

관련 연구 결과는 에너지 분야의 세계적 학술지 ‘줄(Joule)’에 9월 13일자로 온라인 게재*됐으며, 연구의 중요성을 인정받아 표지논문으로 선정되는 쾌거를 거뒀다. ‘줄’은 네이처(Nature) 및 사이언스(Science)와 함께 과학 분야 3대 저널로 꼽히는 셀(Cell)의 에너지 분야 자매지로, 피인용지수(IF) 38.6에 달하는 세계 최정상급 국제 저널이다.

현재 상용화된 리튬이온 이차전지는 가연성 유기 용매를 사용한 액체 전해질로서, 외부 충격이나 파손 시 배터리 내부에서 열폭주(thermal runaway)가 촉발되기 때문에 화재 및 폭발 위험이 있다. 리튬이온 이차전지를 사용한 전기자동차와 휴대용 전자기기에서 발생한 화재 사고는 이미 널리 알려진 문제로, 이 때문에 액체 전해질을 불연성의 고체전해질로 대체하여 높은 안전성을 확보할 수 있는 전고체전지의 상용화를 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행 중이다.

차세대 배터리로 주목받고 있는 전고체전지는 고성능 음극 소재 개발과 관련한 난관이 있는데, 예를 들어 리튬(Li) 금속 음극은 충·방전 과정에서 덴드라이트(dendrite)가 형성돼 성능 저하 및 안전성 문제를 일으킨다. 또한, 실리콘(Si) 기반의 음극 및 무음극(Anodeless)은 낮은 면적 용량(mAh/cm²) 및 고속 충전이 어려운 특성으로 인해 상용화가 어려운 실정이다.



이러한 문제를 해결하기 위해 박철민 교수 연구팀은 주석(Sn) 기반의 합금계 소재인 철-주석 화합물(FeSn₂)을 전고체전지용 음극소재로 제안했다. 연구팀은 실리콘 및 주석과 같은 합금계 음극소재가 리튬과 전기화학적으로 반응해 합금상을 형성하는 과정에서 발생하는 부피 변화에 주목했다. 이 부피 변화가 전고체전지 시스템에서 고체 간의 접촉을 유지하는 데 장애가 될 수 있다는 기존의 통념 극복을 위해, 합금계 음극소재의 기계적 특성을 면밀히 분석했다. 특히, 외부 압력이 가해지는 전고체전지 환경에서 음극소재의 기계적 특성이 전기화학 반응 중 어떤 현상을 초래하는지에 대해 집중적으로 연구했다.

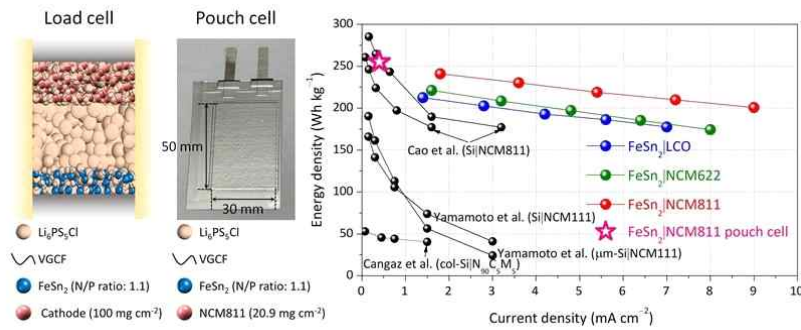
합금계 음극소재 중 ‘실리콘’은 높은 취성(외부에서 힘을 받았을 때 물체가 소성 변형을 거의 보이지 아니하고 파괴되는 현상)과 낮은 변형에너지로 인해 충·방전 시 쉽게 파괴되어 전기적 접촉 손실과 성능 열화를 나타낸다.

반면, 높은 연성과 낮은 변형에너지를 가진 ‘주석’은 충·방전 과정에서 쉽게 파괴되지는 않지만, 큰 변형으로 응집 현상이 발생하고 전극 내에 많은 공극과 균열이 생긴다.

그러나 ‘주석계 화합물(FeSn₂) 음극소재’는 충·방전 과정에서도 공극 및 균열이 관찰되지 않았다. 연구팀은 이러한 현상이 FeSn₂가 적절한 연성-취성 및 높은 탄성-소성 변형에너지를 가지며, 반복적인 충·방전 시에도 재결합(recombination) 반응을 통해 사이클 과정에서 FeSn₂의 결정립 크기가 감소하기 때문임을 확인했다. 특히, 외부 압력이 가해지는 전고체전지 환경에서 높은 탄성-소성 변형에너지가 충·방전 중에 형성된 공극을 메워 입자 간의 접촉을 장기간 유지할 수 있음을 증명했다.

연구팀은 FeSn₂ 음극소재를 활용하여 NCM622 양극과 황화물 고체 전해질(Li₆PS₅Cl)을 적용한 완전셀(full cell)을 제작했으며, 이를 통해 높은 면적 용량(15.54 mAh/cm²)과 높은 에너지밀도(>200 Wh/kg)를 달성했다. 또한, 6분 및 3분 만에 충전이 가능한 10C 및 20C의 고속 충전 조건에서 1,000회 이상의 뛰어난 사이클 안정성을 보였으며, 상용화를 위한 안전성, 넓은 작동 온도 범위, 비용 효율성 및 대량 생산 가능성까지 입증했다.

또한 FeSn₂ 음극을 적용한 파우치형 전고체전지 성능 평가에서도 255 Wh/kg 이상의 높은 에너지밀도를 기록하며 상업적 가능성을 증명했다.



박철민 교수 연구팀은 이번 연구로 차세대 전고체전지의 상용화에 기여할 수 있는 중요한 기술적 돌파구를 마련했으며, 전고체전지 분야에서 합금계 음극소재, 특히 주석 기반 음극의 잠재력을 입증했다. 이번 연구는 전고체전지의 상용화에 한 발 더 가까워질 수 있는 중요한 성과로 평가될 것으로 기대된다.

새로운 이차전지 시스템 및 고용량 리튬이온전지 전극소재 개발 등 차세대 산업동력을 위한 연구를 지속해 온 박철민 교수는 “이번 성과는 리튬 금속계 음극 및 무음극 기반의 음극 소재 개발에 치우친 기존 전고체전지 연구에서 벗어나 새로운 가능성을 제시한 연구”라며, “전고체전지 상용화를 위한 고성능 음극소재 개발에 중요한 기여를 할 수 있을 것”이라고 밝혔다. 이어 “향후 후속 연구를 통해 최적화된 고성능·고안전성 전고체전지의 실현을 위해 노력할 것”이라고 덧붙였다.

이번 연구는 4단계 BK21사업, 한국연구재단의 중견연구자지원사업 및 한국전기연구원의 지원을 바탕으로, 인하대 전기공학부 박철민 교수 연구팀과 한국전기연구원 하운철 박사 연구팀과의 공동 연구로 수행됐다.

책임저자는 국립금오공대 신소재공학부 박철민 교수이며, 신소재공학과 박사과정 이영한 연구원이 제1저자, 인하대 환경공학과 전기공학부 박철민 교수와 한국전기연구원 하운철 박사가 공동 책임저자, 국립금오공대 신소재공학부 최인철 교수, 박사과정 김도현 연구원, 윤정명 연구원, 한국전기연구원 최정희 박사가 공동저자로 연구에 참여했다.

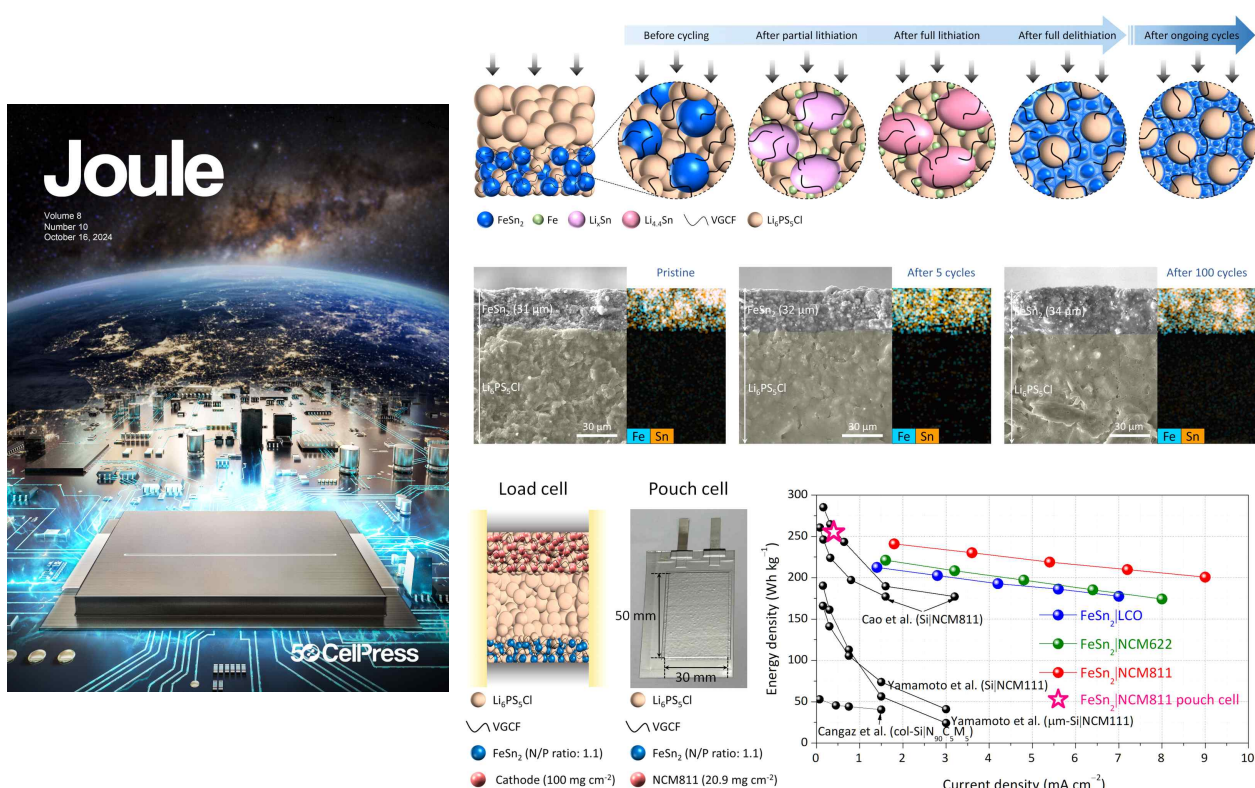
국립금오공과대학교 KIT People(2024.09.24.) https://www.kumoh.ac.kr/ko/sub01_05_02.do?mode=view&articleNo=498945

◆ 관련 기사 ◆

동아일보	금오공대 연구팀, '타지 않는 전고체 전지' 개발	https://www.donga.com/news/Society/article/all/20240925/130103183/2
매일신문	금오공대 박철민 교수 연구팀, 성능·안전성 갖춘 불타지 않는 전고체전지 개발	https://www.imaeil.com/page/view/2024092415532141587
데일리한국	금오공대 박철민 교수 연구팀, 불타지 않는 전고체전지 개발	https://daily.hankooki.com/news/articleView.html?idxno=113087
노컷뉴스	금오공대 박철민 교수팀, 불타지 않는 전고체전지 개발	https://www.nocutnews.co.kr/news/6217752?utm_source=naver&utm_medium=article&utm_campaign=20240924055716
경북도민일보	국립금오공대, 신소재공학부 박철민 교수 연구팀 '세계 최초 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지' 개발	https://www.hidomin.com/news/articleView.html?idxno=560077
대구일보	금오공대 박철민 교수 연구팀, 불타지 않는 전고체전지 개발	https://www.idaegu.com/news/articleView.html?idxno=615637
교수신문	국립금오공대, 신소재공학부 박철민 교수 연구팀 '세계 최고 성능·우수한 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지' 개발	https://www.kyosu.net/news/articleView.html?idxno=124999
머니투데이	박철민 교수팀, 불타지 않는 전고체전지 개발	https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2024092413412858146
베리타스알파	국립금오공대 신소재공학부 박철민 교수 연구팀 '세계 최고 성능·우수한 안정성 갖춘 불타지 않는 전고체전지' 개발	https://www.veritas-a.com/news/articleView.html?idxno=521119
경북매일신문	국립금오공대 박철민 교수 연구팀, '불타지 않는 전고체전지' 개발	https://www.kbmaeil.com/news/articleView.html?idxno=1012478
전자신문	금오공대, 불타지 않는 전고체 전지 개발...고성능 음극소재 개발에 기여 전망	https://www.etnews.com/20240924000162
한국대학신문	국립금오공대 박철민 교수팀, 세계 최고 성능의 불타지 않는 전고체전지 개발	https://news.unn.net/news/articleView.html?idxno=568759

Empowering all-solid-state Li-ion batteries with self-stabilizing Sn-based anodes

Young-Han Lee, Do-Hyeon Kim, Jeong-Myeong Yoon, In-Chul Choi,
Jeong-Hee Choi, Ki-Joon Jeon*, Yoon-Cheol Ha*, and Cheol-Min Park*



All-solid-state Li-ion batteries (ASSLIBs) are promising but face several challenges, especially regarding Li-metal anodes prone to dendrite formation and Si-based anodes with limited performance. To address this issue, we propose a self-stabilizing Sn-based anode. While Sn anodes suffer from agglomeration during cycling, transition metal-Sn anodes, specifically FeSn₂ anodes, self-stabilize during cycling by exhibiting uniformity and densification without cycling-induced agglomeration, owing to their unique electrochemical- cycling-induced size reduction and distinctive mechanical properties. A full cell with an FeSn₂ anode, a LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O₂ cathode, and a Li₆PS₅Cl solid electrolyte exhibits highly reversible areal capacity (15.54 mAh cm⁻² at 100 mg cm⁻² cathode loading), excellent rate capability (74.5%/83.2% retention over 1,000 cycles at 10/20 C), and exceptional energy density at high current densities. The self-stabilizing FeSn₂ anodes offer high energy density, compatibility with solid electrolytes, safety, wide operating temperature range, cost effectiveness, and scalability, thereby accelerating the realization of superior ASSLIBs.

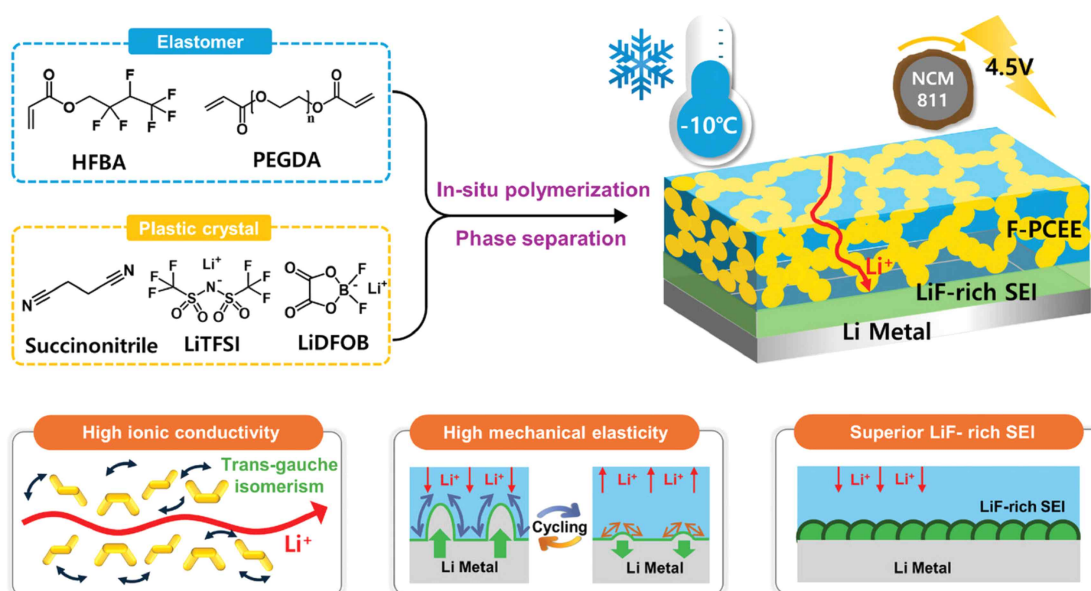
에너지저장

Advanced Materials

Volume 36, Jul. 2024, 2403191 (Impact Factor : 27.4)

Design of Fluorinated Elastomeric Electrolyte for Solid-State Lithium Metal Batteries Operating at Low Temperature and High Voltage

Jinseok Park, Hyeonseok Seong, Chanhoo Yuk, Dongkyu Lee, Youyoung Byun, Eunji Lee, Wonho Lee, Bumjoon J. Kim*



This work demonstrates the low-temperature operation of solid-state lithium metal batteries (LMBs) through the development of a fluorinated and plastic-crystal-embedded elastomeric electrolyte (F-PCEE). The F-PCEE is formed via polymerization-induced phase separation between the polymer matrix and plastic crystal phase, offering a high mechanical strain ($\approx 300\%$) and ionic conductivity ($\approx 0.23 \text{ mS cm}^{-1}$) at -10°C . Notably, strong phase separation between two phases leads to the selective distribution of lithium (Li) salts within the plastic crystal phase, enabling superior elasticity and high ionic conductivity at low temperatures. The F-PCEE in a Li/LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ full cell maintains 74.4% and 42.5% of discharge capacity at -10°C and -20°C , respectively, compared to that at 25°C . Furthermore, the full cell exhibits 85.3% capacity retention after 150 cycles at -10°C and a high cut-off voltage of 4.5 V, representing one of the highest cycling performances among the reported solid polymer electrolytes for low-temperature LMBs. This work attributes the prolonged cycling lifetime of F-PCEE at -10°C to the great mechanical robustness to suppress the Li-dendrite growth and ability to form superior LiF-rich interphases. This study establishes the design strategies of elastomeric electrolytes for developing solid-state LMBs operating at low temperatures and high voltages.

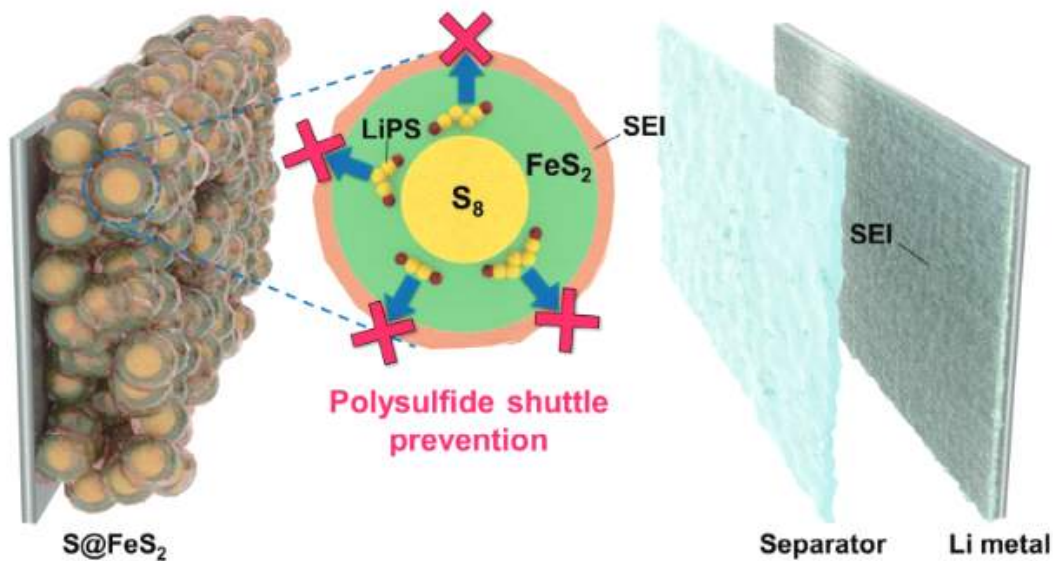
에너지저장

Small

September 2024, online published (Impact Factor : 13.0)

S@FeS₂ Core-Shell Cathode Nano material for Preventing Polysulfides Shuttling and Forming Solid Electrolyte Interphase in High-Rate Li-S Batteries

Dong Guk Kang, Farkhod Azimov, Dahye Seo, Garyeong Park, Min-Geun Oh, Hyeon Gyu Lee, Young Joo Lee, Hyun Min Jung,* and Seung-Wan Song*



Lithium-sulfur (Li-S) battery is a potential next-generation energy storage technology over lithium-ion batteries for high capacity, cost-effective, and environmentally friendly solutions. However, several issues including polysulfides shuttle, low conductivity and limited rate-capability have hampered its practical application. Herein, a new class of cathode active material with perfect core-shell structure is reported, in which sulfur is fully encapsulated by conductivity-enhancing FeS₂ (named as S@FeS₂), for high-rate application. Surface-stabilized S@FeS₂ cathode exhibits a stable cycling performance under 200 times higher rates (1-2 C, charged in 30-60 min) than standard rates (e.g., 0.1-0.5 C, charged in 2-10 h), without polysulfides shuttle event. Surface analysis results reveal the unprecedented formation of a stable solid electrolyte interphase (SEI) layer on S@FeS₂ cathode, which is distinguished from other sulfur-based cathodes that are notable to form the SEI layer. The data suggest that the prevention of polysulfides shuttling is owing to the surface protection effect of FeS₂ shell and the SEI layer formation overlying core-shell S@FeS₂. This unique and potential material concept proposed in the present study will give insight into designing a prospective fast charging Li-S battery.

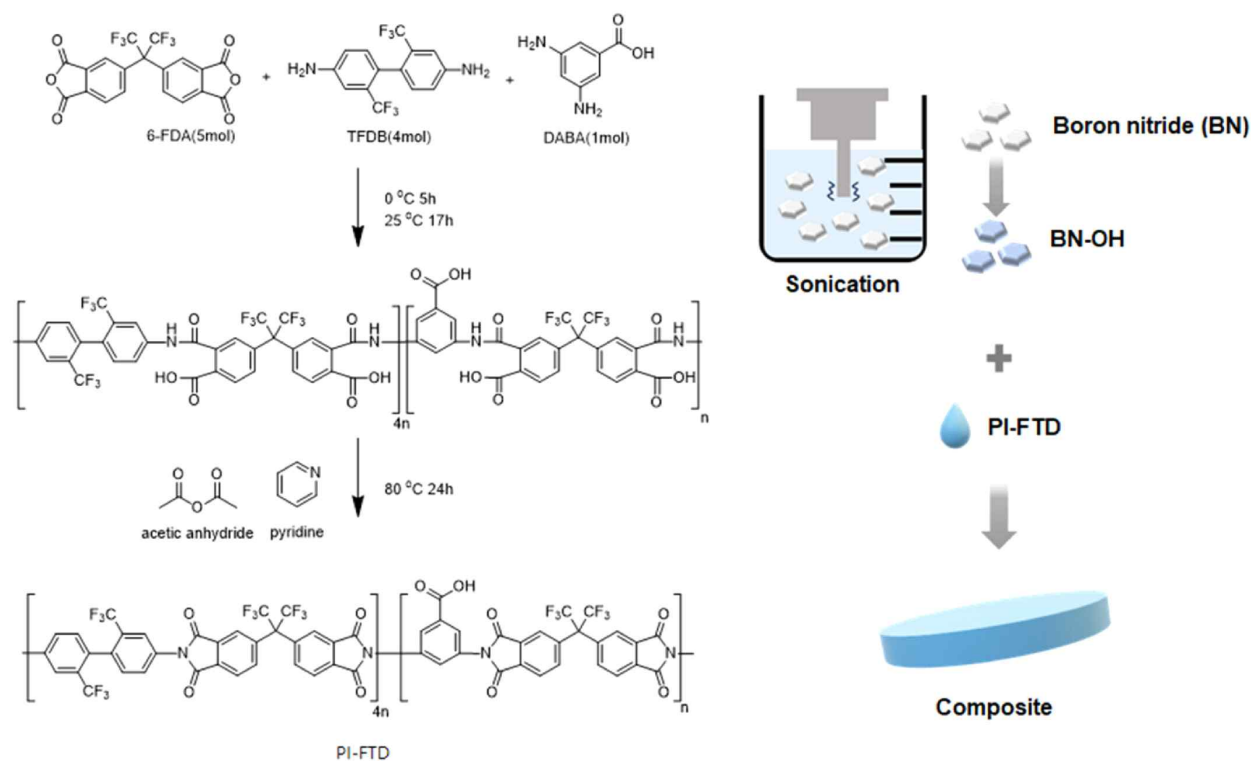
에너지저장

Polymer Composites

August 2024, online published (Impact Factor : 4.8)

Synthesis of a novel fluorinated polyimide for preparing thermally conductive polyimide composites

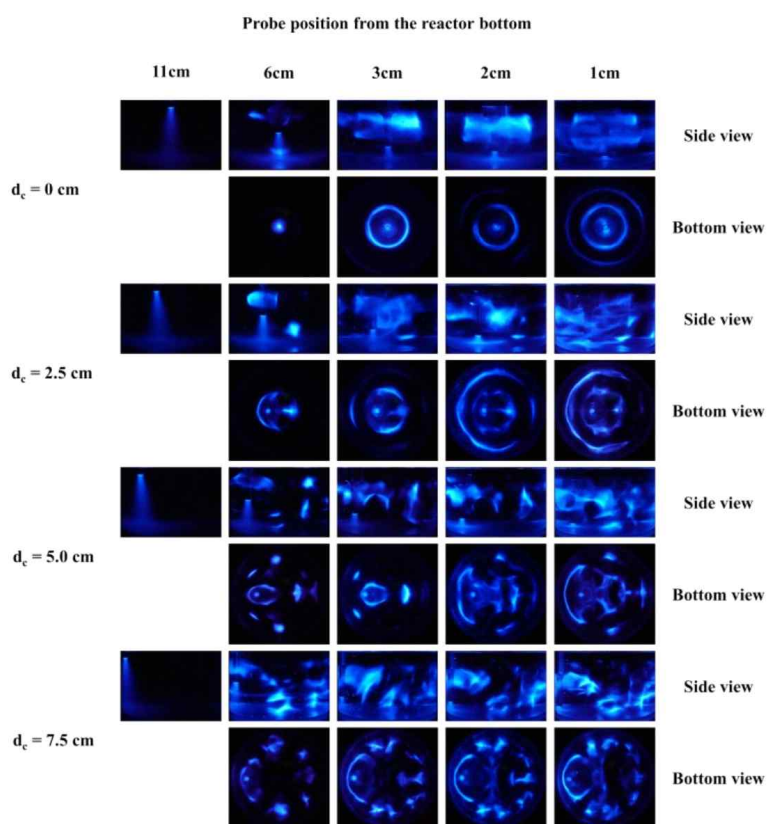
Wondu Lee, Jihoon Kim, Hyeokgi Hong, Hohyeon Noh, Dabin Park, Hyun Min Jung*, Jooheon Kim*



A fluorinated polyimide (PI-FTD) was synthesized for preparing a thermally conductive PI matrix and composites. Additionally, surface-treated boron nitride (BN) was incorporated into the PI-FTD via the solution casting method to form efficient heat paths along the through-plane direction. The resultant composite demonstrated remarkable characteristics, including an impressive through-plane thermal conductivity of 3.6 W mK^{-1} , a substantial tensile strength of 69.4 MPa, and excellent thermal stability. When this composite was applied to light-emitting diodes, it effectively managed heat, reducing the operating temperature by 29 °C. The PI-FTD/BN-OH composites can potentially improve thermal management in electronic devices.

Sonochemical oxidation activity in 20-kHz probe-type sonicator systems : The effects of probe positions and vessel sizes

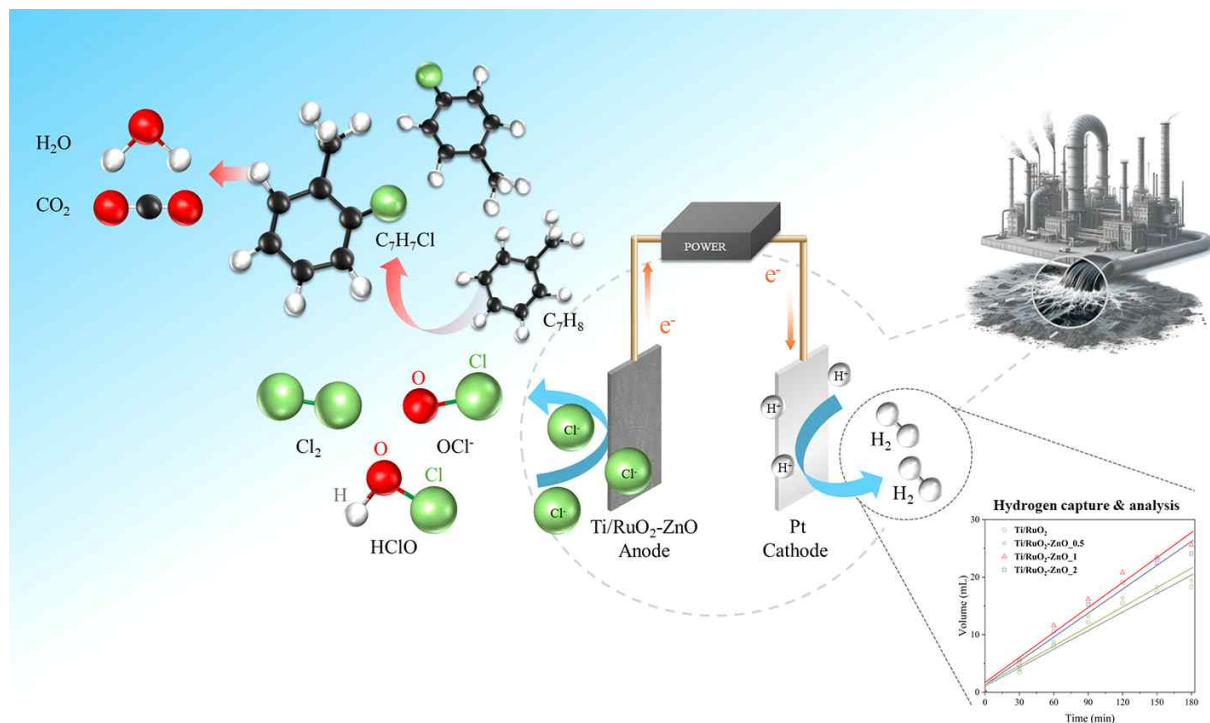
Iseul Na, Younggyu Son*



The 20-kHz probe-type sonicator systems were investigated for the enhancement of the cavitation oxidation activity under various geometric conditions including vertical and horizontal probe positions and vessel sizes/volumes as a following study to our previous study. The sonochemical oxidation activity (mass-based I_3^- ion generation rate) increased significantly for all vessel size conditions as the probe was placed close to the vessel bottom, owing to the expansion of the sonochemical active zone induced by the reflections of ultrasound at the bottom and the reactor wall. A concentric circular active zone is observed at positions close to the bottom. The highest sonochemical activity was obtained at 1 cm (vertical position) in the 20 cm vessels (input power: 50 %). At the vertical positions of 11 cm to 7 cm, no significant difference in the sonochemical activity was observed for all input power conditions (25, 50, and 75 %) because no meaningful reflections occurred. Higher sonochemical activities were obtained at an input power of 75 % owing to the increased power and strong reflection. The highest cavitation yield considering the energy efficiency was obtained at 6 cm (vertical position) for 75 % of all power and geometric conditions. Horizontal probe position tests showed that the asymmetric formation of the sonochemical active zone could significantly enhance the sonochemical activity. The highest activity was obtained at 1 cm (vertical position) and 2.5 cm (horizontal position) in the 20 cm vessel.

Synthesis of multifunctional Ti/RuO₂-ZnO composite catalytic electrodes for electrochemical oxidation and hydrogen production from toluene-containing wastewater

Yong-Beom Cho, Sung-Eun Lee, Tae-Oh Kim*



Developing electrodes that effectively perform indirect oxidation on nondecomposable organic compounds is a key objective in electrochemical oxidation research. This study focuses on fabricating a Ti/RuO₂-ZnO electrode through a simple pyrolysis method on a Ti substrate etched with hydrochloric acid. Hydrochloric acid etching played a pivotal role in enhancing coating stability by markedly increasing the Ti substrate's surface area and hydrophilicity. Analyzing the linear sweep voltammetry revealed that the electrode exhibited a low overvoltage of the oxygen evolution reaction, reaching 221 mV at 10 mAcm⁻², indicating effective use as an active anode. The electrode's performance was evaluated by removing toluene contained in a 0.1M NaCl solution at pH 5. The electrochemical reaction generated active chlorine in the solution, oxidizing 98.66 % of toluene over 3 h and concurrently producing 25.62 mL of hydrogen. This study presents a simple and effective synthesis of a RuO₂-based active anode, demonstrating its potential application not only in removing toluene from wastewater but also in hydrogen production.