

## 리튬이온 배터리 열폭주 기반의 추력발생 이론 및 응용

김민석\* · 라젠드라 라자\* · 임대홍\* · 여재익\*\*†

\*서울대학교 항공우주공학과, \*\*서울대학교 항공우주공학과 및 항공우주신기술연구소

Utilizing Lithium-Ion Battery Thermal Runaway for an Advanced Propulsion:  
Theory Development and Case Studies

Minseok Kim\*, Rajendra Rajak\*, Daehong Lim\* and Jai-ick Yoh\*\*†

\*Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

\*\*Department of Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

(Received 5 September 2024, Received in revised form 14 November 2024, Accepted 14 November 2024)

## ABSTRACT

This study explores the theoretical potential of using thermal runaway in lithium-ion batteries for propulsion systems. Lithium-ion batteries, essential in various applications, are prone to thermal runaway, a phenomenon that can cause rapid temperature increases and energy release due to electrochemical and chemical reactions within the battery. While traditionally considered a safety risk, recent research has suggested leveraging this phenomenon for energy conversion and propulsion technology development. This paper aims to construct theoretical models of electrochemical systems, analyze the relationship between voltage and heat generation, and investigate how to control thermal runaway for desired thrust generation. The study presents three key scenarios: a system without chemical reactions at low temperatures, a system where chemical reactions occur at high temperatures, and a system involving rapid flow and high-speed reactions. By analyzing the linear relationship between voltage and heat generation, the research demonstrates the feasibility of controlling heat output through voltage adjustments. Additionally, the study evaluates the potential of using the combustion of gases produced during thermal runaway for propulsion, highlighting its applicability in space debris removal and other space-related activities. The findings suggest that controlling the combustion mechanism during thermal runaway could lead to the development of a novel electrochemical propulsion technology for the space industry.

**Key Words** : Lithium-ion battery, Thermal runaway, Electrochemical system, Chemical propulsion

## 기 호 설 명

$A_i$ : Pre-exponential factor (n+1th order reaction) [L <sup>n</sup> /mol <sup>n</sup> · s]	$k$ : Reaction rate coefficient (n+1th order reaction) [L <sup>n</sup> /mol <sup>n</sup> · s]
$c_p$ : Specific heat capacity at constant pressure [J/kg · K]	$k_m$ : Charge transfer rate constant ( $D/\delta_c$ ) [m/s]
$c$ : Molar concentration [mol/m <sup>3</sup> ]	$M$ : Molar mass [kg/mol]
$c_{Ox}$ : Concentration of the species to be oxidized [mol/m <sup>3</sup> ]	$\vec{N}$ : Mass flux [mol/m <sup>2</sup> · s]

†Corresponding Author, [jjyoh@snu.ac.kr](mailto:jjyoh@snu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$c_{Red}$ : Concentration of the species to be reduced [mol/m <sup>3</sup> ]	$n$ : Number of electrons participating in the reaction
$c_{Ox}^*$ : Reference concentration of $c_{Ox}$ [mol/m <sup>3</sup> ]	$p$ : Pressure of the mixture [Pa]
$c_{Red}^*$ : Reference concentration of $c_{Red}$ [mol/m <sup>3</sup> ]	$Q, q$ : Quantity of electric charge [C]
$c_c$ : Cathode surface concentration [mol/m <sup>3</sup> ]	$R$ : Gas constant [J/mol · K]
$c_0$ : Concentration at the bulk solution [mol/m <sup>3</sup> ]	$r$ : Central distance of two charges [m]
$D$ : Diffusion coefficient [m <sup>2</sup> /s]	$s$ : Stoichiometric coefficient
$\vec{E}$ : Electric field [V/m]	$T$ : Temperature [K]
$E_a$ : Activation energy [J/mol]	$u$ : Ion mobility [m <sup>2</sup> /V · s]
$E$ : External voltage [V]	$\vec{v}$ : Velocity vector [m/s]
$E_{eq}$ : Equilibrium potential [V]	$z$ : Charge number of an ion
$F$ : Faraday constant [C/mol]	$\alpha_a$ : Anodic charge transfer coefficient
$\vec{f}_e$ : Coulomb force [N]	$\delta_c$ : Diffusion layer thickness [m]
$\Delta H_c$ : Heat of reaction of a chemical reaction [J/mol]	$\epsilon$ : Absolute permittivity of the mixture [F/m]
$\Delta H_e$ : Heat of reaction of an electrochemical reaction [J/mol]	$\mu$ : Viscosity of the mixture [Pa/m]
$i$ : The subscript $i$ refers to the property of the $i$ -th chemical species	$\rho$ : Density of the mixture [kg/m <sup>3</sup> ]
$\vec{j}$ : Current density [A/m <sup>2</sup> ]	$v_c$ : Reaction rate of a chemical reaction [mol/s]
$j_0$ : Exchange current density [A/m <sup>2</sup> ]	$v_e$ : Reaction rate of an electrochemical reaction [mol/s]
$K$ : Thermal conductivity [W/m · K]	$\phi$ : Electric potential [V]

## 1. 서 론

리튬 이온 배터리는 다양한 응용 분야에서 필수적인 에너지 저장 장치로 자리 잡고 있다. 그러나 이 배터리는 열폭주 현상을 일으킬 수 있는 잠재적 위험 요소를 지니고 있다. 열폭주는 배터리 내부에서 발생하는 전기화학적 및 화학적 반응으로 인해 급격한 온도 상승과 에너지 방출을 초래하는 현상으로, 배터리의 성능과 안전성이 크게 위협받을 수 있다. 최근 들어, 열폭주 현상을 단순히 위험 요소로 인식하는 것을 넘어, 이를 활용한 새로운 에너지 변환 및 추진 기술 개발이 존재한다[1]. 특히, 리튬 이온 배터리의 열폭주를 이용하여 강력한 추력을 발생시키는 전기화학 추진 시스템은 차세대 에너지 기술로서 가치가 있다.

전기화학 반응과 열화학 반응의 이론적 구분은 전자가 화학적 과정에 관여하는 것에 있다[2]. 전기화학 시스템은 전위차에 의한 전자의 이동으로 화학 반응이 발생하는 것으로부터 에너지를 얻는다. 모든 물질은 서로 다른 전자 친화도를 갖는다. 이는 두 물질의 접촉만으로도 전위차에 의한 전하의 이동을 발생시킨다. 전기화학 시스템을 구성하기 위해서는 두 개의 전극과 전해질이 필수적인 구성요

소이다. 전해질로부터 전자를 얻어 외부 회로로 방출하는 산화반응이 일어나는 전극을 애노드(anode)라 하고, 외부 회로로부터 전자를 얻어 전해질로 방출하는 환원 반응이 일어나는 전극을 케소드(cathode)[3]라고 한다. 산화환원 반응은 전자가 외부 도선으로 흐르는 방향을 기준으로 명명되어야 한다는 점에 유의해야 한다. 실제 전자는 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 전이될 때 에너지를 방출한다. 그러나 역사적으로 전자의 이동 방향과 반대인 전류의 방향에 의해 전위가 정의되어 왔다. 애노드와 케소드 전위와 관계없이 전류의 방향만을 기준으로 정의된다. 예를 들어, 배터리에서 양극은 더 높은 전위로 인해 방전 시 케소드 역할을 하는 반면, 충전 시에는 더 높은 전위를 갖는 양극이 애노드가 된다. 다만 배터리에서는 예외적으로 양극을 케소드, 음극을 애노드로 명칭을 고정하여 사용한다.

전기화학 시스템은 다양한 분야, 특히 미래 에너지 연구 분야에서 다양한 응용 분야에서 발전을 하고 있다. 에너지를 저장 및 사용만 하는 배터리와는 달리 수소 연료 배터리는 수소와 산소를 촉매적으로 결합하여 에너지를 생산한다[4]. George 외[5]의 연구는 전기화학 시스템의 특성에

따른 저항 증가를 줄이기 위해 외부 흐름을 이용하여 기체 방출과 전극 사이의 표면 장력을 극복하는 등 수소 연료 전지의 문제점을 해결한다. 또 다른 응용은 담수와 염수의 농도 차이를 이용하여 전위차를 발생시키는 것이다[6]. 배터리의 분리막과 마찬가지로 담수와 염수의 농도차로 인한 이온의 이동으로 전력을 생산하기 위해 이온 전달만을 허용하는 막을 사용한다. 전기화학 시스템의 대표적인 예로 배터리를 들 수 있다. 배터리는 음극, 양극, 전해질, 분리막으로 구성되며, 이 네 가지 필수 요소를 특징으로 한다. 이 중 분리막은 배터리를 다른 전기화학 시스템과 구별되는 차이점이며, 막과 마찬가지로 단 하나의 이온의 이동을 용이하게 한다. 리튬 이온 배터리의 경우 양극에는 리튬 산화물이 있고, 음극에는 흑연이 있다. 리튬 산화물은 배터리를 충전할 때 전자를 방출하여 리튬 양이온을 발생시킨다. 분리막의 선택성으로 리튬 양이온만 양극 쪽으로 이동하여 전자를 얻고, 흑연층과 리튬 분자로 결합한다. 반대로 방전 시에는 음극에 결합되어 있던 리튬 이온만 분리막을 통과하여 양극과 결합한다. 전기자동차의 급속한 확산에 따라 열폭주와 같은 배터리에 대한 문제가 점점 더 중요해지고 있다[7]. 이를 해결하기 위한 적극적인 노력이 필요하다. 리튬 이온 배터리가 현재 주류를 이루고 있지만, 대체 물질을 찾는 광범위한 연구가 진행 중이다 [8]. 재미있게도 본 연구는 열폭주의 추진제로서의 잠재적 활용 가능성을 제시하여 배터리에 대한 새로운 접근 방식을 시사한다.

Electrically controlled solid propellant(ECSP)는 전기화학 시스템 영역에서 가장 진보적인 예이다. Gobin 외 [9]의 연구에 따르면, ECSP는 배터리와 유사한 원리로 작동하며, 열 모델 역시 비슷한 과정을 따를 것으로 예상하였다. 특히 분리막 분해 또는 파괴 시 배터리와 ECSP는 양이온과 음이온의 이동으로 각각의 전극에서 전기화학적 반응을 통해 열을 방출하는 유사성을 나타낸다.

기존 연구들은 리튬 이온 배터리에 대한 열폭주 예측 [10]과 특성[11] 또는 ECSP[12-14]에 대한 연소 특성에 초점을 맞추었다. 본 연구는 열폭주 과정에서 생성되는 에너지를 효과적으로 제어하고, 이를 통해 원하는 추진력을 얻기 위한 이론적 연구를 목표로 한다. 이를 위해, 전기화학 시스템의 이론적 모델을 구축하고, 전압과 발열량 간의 관계를 분석하여 열폭주를 제어하는 방법을 모색한다. 또한, 열폭주 과정에서 발생하는 연소 메커니즘을 중점적으로 연구하여, 이 시스템이 다양한 산업 응용에서 어떻게 활용될 수 있는지 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 지배 방정식

두 물질 간의 전자 친화도의 차이는 전하의 밀도 차이를 발생시킨다. 전하는 전위 또는 전기 포텐셜의 차이를 만들며 이는 전기장을 이루게 한다. 전기장 내의 전하들 즉, 전자 또는 이온은 이동을 하게 된다. 전자가 이동하는 과정에서 서로 다른 물질 간 전자를 주고받으며 산화 환원 반응이 발생할 때 이를 전기화학 반응이라 한다. 전자가 이동하기 위해서는 자유전자를 갖는 고체 상태의 물질이 필요하다. 반면 액체 상태의 물질에서는 원자 또는 분자간의 거리가 전자가 직접 이동하기에는 충분히 가까지 못하다. 하지만 많은 이온결합 형태의 물질들이 극성 매질에 용해되어 이온 상태가 되며 전하를 띄게 된다. 전하를 띄는 이온은 액체 상태의 물질 내에서 이동이 가능하여 전하의 전달 매개로써 역할을 한다. 이와 같이 전자 또는 이온에 의한 양전하의 흐름 또는 음전하의 역흐름을 전류라고 한다. 원자 또는 분자 내에서 높은 에너지 준위에 존재하는 전자가 낮은 에너지 준위로 이동하는 현상이 전하가 움직이는 원리이다. 하지만 역사적으로 전자가 발견되기 이전부터 전위는 양전하를 기준으로 정의되었다. 이 때문에 전류 역시 양전하의 흐름으로 정의되었다. 이 장에서는 전위의 형성과 전기화학 반응 그리고 이온의 이동에 대한 이론적인 배경을 설명한다.

#### 2.1.1 전기 포텐셜

전자기력은 쿨롱 법칙에 의해 식 (1)과 같이 두 전하 사이에 작용하는 인력 또는 척력으로 정의된다. 쿨롱 법칙의 형태는 우리에게 친근한 만유인력의 형태와도 같다. 만유인력에서 중력장을 정의할 수 있듯 자기장의 영향을 무시한 전자기력에서 전기장을 정의할 수 있다.

$$\vec{f}_e = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r^2} = q\vec{E}_e \quad (1)$$

전기장은 열린 영역에서 연속인 벡터장이며 적분값이 경로에 독립인 보존적 벡터장으로 식 (2)과 같이 스칼라 값의 포텐셜 함수를 정의할 수 있다. 이를 전기 포텐셜이라 명명하며 전위라고 부르기도 한다. 우리가 흔히 접하는 전압은 두 전위의 차이인 전위차에 해당한다.

$$\vec{E}_e = -\nabla\phi \quad (2)$$

가우스 법칙에 의해 폐곡면을 통과하는 전기 선속과 폐곡면속 총 전하량이 동일하며 이를 발산 정리를 이용하여 미분의 형태로 나타낼 수 있다. 식 (2)의 정의에 의해 식 (3)과 같이 푸아송 방정식의 형태로 나타내어 공간에 대한 전기 포텐셜을 나타낸다.

$$\nabla^2 \phi = -\nabla \cdot \vec{E}_c = -\frac{F}{\epsilon} \sum_i z_i c_i \quad (3)$$

모든 전기 시스템은 정상 상태에 도달하였을 때 전하 균형을 성립하게 된다. 이는 도메인의 어느 지점에서나 전기적으로 중성이 됨을 의미한다. 하지만 완전한 정상 상태에 도달하기 이전에는 극소적으로 전하의 집중으로 인한 불균형이 발생한다. 물론 전체 도메인에 대해서는 전기적 중성이 항상 성립한다. 전하 균형식은 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며 식 (3)에 대입하여 라플라스 식을 구성할 수 있다. 이는 곧 전하 균형이 성립하는 구간에서는 전위가 위치에 대한 선형 방정식으로 나타내어진다.

$$\sum_i z_i c_i = 0 \quad (4)$$

### 2.1.2 전기화학시스템의 열 발생원리

전기화학시스템에서 발생하는 열의 종류는 크게 세가지로 분류가 가능하다. 첫째로 화학반응에 의한 열, 둘째는 전기화학반응에 의한 열, 마지막으로 세번째는 전위의 높낮이가 다른 공간을 전하가 이동하며 발생하는 줄 발열이다. 화학반응은 모든 도메인에 대하여 아레니우스 방정식에 의해 반응율을 식 (5), (6)과 같이 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

$$k_i = A_i e^{-\frac{E_{a_i}}{RT}} \quad (5)$$

$$v_{c,i} = k_i \prod_j c_{i,j}^{s_{i,j}} \quad (6)$$

반면 전기화학 반응은 전자가 직접 참여해야 하는 반응으로 전자는 고체상태의 전극에서만 이동이 가능하기 때문에 전극 표면에서만 이루어지게 된다. 전기화학 반응을 정의하기 위해서는 과전위의 개념을 이해하는 것이 필수적이다. 과전위는 외부전압과 평형 전위의 차에 의해 정의된다. 전극과 전해질이 접촉하면 전극 근처의 이중층(double layer) 안에서 흥미로운 현상이 일어난다. 전극과 전해질이 만나는 곳에 아주 얇은 막인 내부 헬름홀츠 평면(Inner Helmholtz Plane, IHP)이 형성되고, 이곳에 위치한 이온들은 전극과 같은 전하로 하전 된다. 같은 전극을 띤 입자가 전극에 위치하기 위해 둘 사이에는 반데르발스(Van der Waals) 힘이 작용하며 IHP평면은 전극으로부터 0.2 nm 즉 원자 한 개의 지름 만큼 가까운 위치에 형성된다. IHP 바로 바깥은 반대로 하전된 이온으로 이루어진 외부 헬름홀츠 평면(Outer Helmholtz Plane, OHP)이 있다. OHP는 쿨롱 힘에 의해 존재하며 이 역시 0.2 nm의 얇은 두께를 갖는다. IHP부터 OHP 바로 바깥에 diffuse layer라 부르는 1~10 nm의 얇은 층 까지를 이중층이라고 부른다. 이 영역들은 전기화학 반응에 직접적으로 관여하여 급격한 전압 강하를 일으키는 과전위(overpotential)를 발생시킨다. 이중층까지는 전하의 집중이 있어 전하 균형이 성립하지 않는다. 반면 이중층 바로 바깥에는 확산층(diffusion layer)라 불리는 픽스 법칙에 의한 확산 지배적인 구간이 존재한다(diffuse layer와 diffusion layer의 용어 혼돈을 유

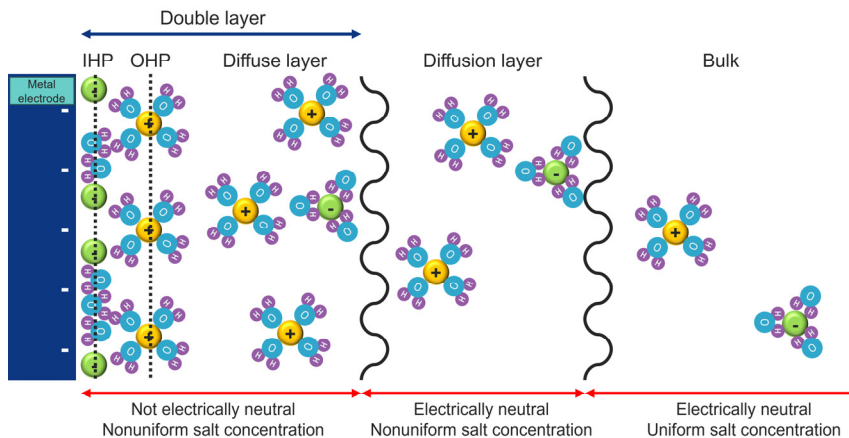
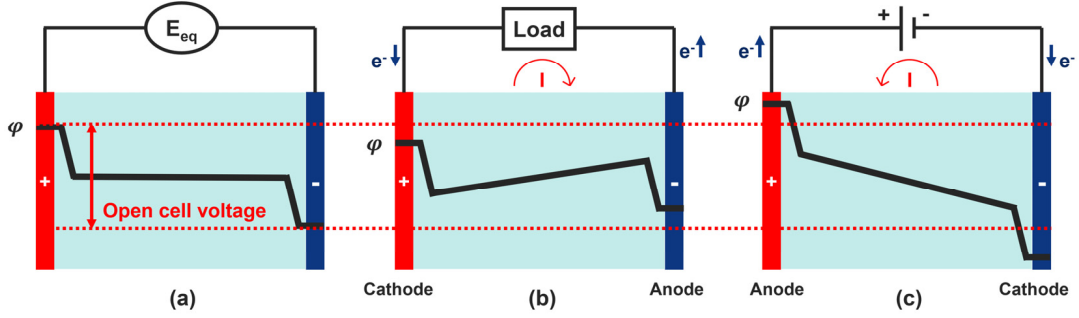


Fig. 1. Structures near electrodes in electrochemical systems.



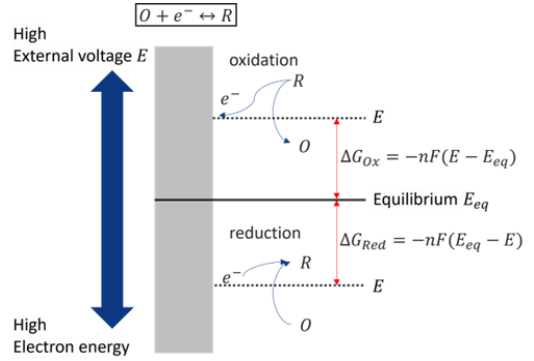
**Fig. 2.** (a) Open cell voltage of the electrochemical system is equal to the equilibrium potential. (b) When the electrochemical system is connected to an external circuit, the measured voltage becomes smaller than the open cell voltage. (c) When electric power is supplied, the measured voltage becomes bigger than the open cell voltage.

의 해야 한다. 네른스트 확산층(Nernst diffusion layer)이라고도 부르는 0.03 mm 정도의 영역부터는 전하 균형이 성립하여 앞서 설명한 바와 같이 전위가 선형적인 분포를 나타내게 된다. 확산층 바깥은 벌크(Bulk)라고 부르며 전극에서 충분히 멀어 이온의 농도가 균일해지는 영역이다. Fig. 1에 이중층의 모식도를 나타내었다. 이중층 내에서 발생하는 전기화학반응은 산화-환원 반응을 통해 에너지를 얻거나 잃는다. 외부 전압과 평형 전위의 차이 과전위는 전기화학반응을 위한 에너지를 공급하는 역할을 한다. 평형 전위는 비가역성을 일으킬 수 있는 전류와 농도 구배가 없는 평형 조건에서의 전위로 정의된다[15]. 이는 외부 회로가 연결되어 있지 않을 때의 전위차인 개방 회로 전위로 간접적으로 측정 가능하다[16]. 개방 회로 전위를 측정하기 위해서는 고임피던스 전압계가 필요하다. 그러나 실제로는 높은 임피던스에도 불구하고 전류가 흐르기 때문에 Fig. 2(b)와 같은 전위 분포가 발생하며, 이는 Fig. 2(a)와 같은 이상적인 시나리오와 대조된다.

Fig. 3은 전기화학반응이 어떻게 에너지를 발생시키는 지 도식화한 그림이다. 산화-환원 반응을 모두 고려하여 과전압에 의한 발생 전류 밀도를 아레니우스 방정식을 통해 도출해낸 식이 식 (7) 버틀러-볼머 식이다. 식 (8)은 반응을 나타낸다. 즉, 전기화학반응이 활발할수록 높은 전류가 흐르게 된다.

$$\vec{j}_i = j_0 \left\{ \frac{c_{Ox,i}}{c_{Ox,i}^*} \exp \left[ \frac{\alpha_{a,i} n_i F}{RT} (E - E_{eq}) \right] - \frac{c_{Red,i}}{c_{Red,i}^*} \exp \left[ -\frac{(1 - \alpha_{a,i}) n_i F}{RT} (E - E_{eq}) \right] \right\} \quad (7)$$

$$\nu_{e,i} = \frac{\vec{j}_i}{n_i F} \quad (8)$$



**Fig. 3.** Principles and energy relationship of electrochemical reactions.

마지막으로 전하의 수송 일에 의한 발생열인 줄 발열의 식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며 화학반응, 전기화학반응, 줄 발열에 의한 열을 모두 고려한 에너지 보존식을 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}_{Joul} = \|\nabla \phi\| \|\vec{j}\| \quad (9)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T \vec{v}) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q}_{Joul} + \sum_j (\nu_{c,j} \Delta H_{c,j} + \nu_{e,j} \Delta H_{e,j}) \quad (10)$$

### 2.1.3 수송 방정식

네른스트-플랑크 방정식은 이온의 수송을 설명할 때 주로 사용되는 방정식이다. 기본적으로 종 수송 방정식을 물질량으로 나눈 형태이며 대류항과 픽스 법칙에 의한 확산항이 포함되어 있으며 마지막으로 쿨롱힘에 의한 전자기력 이류항이 존재한다. Smoluchowski 방정식에 의하면

플럭스를 확산항과 이류항의 합으로 나타낼 수 있으며 식 (1), (2)에 의해 식 (11)과 같이 표현된다. 화학종 수송 방정식은 식 (12)로 표현하며, 식 (13)의 네른스트-아인슈타인 관계를 이용해 유동성을 확산계수로 표현 후 식 (11)일 식 (12)에 대입하면 식 (14)의 네른스트-플랑크 방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned}\vec{N}_i &= c_i \vec{v} - D_i \nabla c_i + u_i c_i \vec{f}_e \\ &= c_i \vec{v} - D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi\end{aligned}\quad (11)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{N}_i = \dot{c}_i \quad (12)$$

$$u_i = \frac{D_i}{RT} \quad (13)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( c_i \vec{v} - z_i \frac{D_i}{RT} F c_i \nabla \phi - D_i \nabla c_i \right) = \dot{c}_i \quad (14)$$

이 때 식 (14)의 우항에 해당하는 생성항은 앞서 다룬 화학반응에 의한 반응률 식 (5), (6)과 전기화학반응에 의한 반응률 식 (7), (8)에 의해 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{c}_i = s_{c,i} \nu_{c,i} + s_{e,i} \nu_{e,i} \quad (15)$$

전류는 단위 시간 동안 이동한 전하의 양으로 정의되며, 전류 밀도는 단위 면적당 전류에 해당한다. 식 (7)에서 버틀러-볼머 식에 의해 전류 밀도는 반응율에 비례하기도 하지만 정의에 의해 식 (16)과 같이 플럭스를 이용해 나타낼 수 있다. 즉 전류 밀도란 반응율과 플럭스 모두에 비례한다.

$$\begin{aligned}\vec{j} &= \sum_i \vec{j}_i = F \sum_i z_i N_i \\ &= F \sum_i z_i \left( c_i \vec{v} - D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi \right)\end{aligned}\quad (16)$$

정상 상태일 때 식 (14)에 의해 플럭스의 다이버전스는 0이 된다. 이를 이용하면 전류 밀도의 다이버전스 역시 식 (17)과 같이 0이 됨을 알 수 있다. 이를 전류 균형 상태라 부른다. 또한 전하 균형이 만족할 때도 식 (17)을 만족하게 된다.

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (17)$$

## 2.2 전기화학 시스템

### 2.2.1 리튬 이온 배터리

배터리의 큰 난제 중 하나로 열폭주의 위험을 꼽을 수 있다. 열폭주의 원인으로는 기계적 손상, 전기적 손상, 열적 손상이 있으며 이들은 모두 분리막의 손상으로 내부 단락에 의해 열폭주가 발생한다는 공통점을 갖고 있다[17]. 열폭주의 원인들을 Fig. 4와 같이 열폭주의 메커니즘을 기준으로 분리막의 손상과 SEI(solid electrolyte interface)막의 분해 중 무엇이 먼저 발생하는가에 따라 두 가지로 구분해 볼 수 있다. 메커니즘을 살펴보면 기계적 손상은 외부 충격에 의해 SEI와 분리막에 손상이 발생해 전기화학반응이 발생한다. 전기적 손상은 과방전과 과충전으로 나눌 수 있다. 과방전은 SOC(State of Charge)가 -10% 미만으로 낮아질 때 애노드와 전해질의 직접적인 접촉을 막고 있는 SEI의 분해로 시작된다[18]. SEI가 분해됨으로써 전해질과 애노드가 직접 만나게 된다. 이 때 컬렉터에 해당하는 구리가 전기화학반응에 의해 분해되어 전체 양이온의 농도가 증가하게 된다. 이는 높은 전류와 함께 반응율을 높여 연쇄 반응과 함께 열폭주를 발생시킨다. 반면 과충전의 경우는 오히려 기계적 손상과 비슷한 양상을 보인다. SOC가 120% 이상으로 높아지면 SEI의 결정이 자라나면서 분리막을 물리적으로 손상시키게 된다. 이후로는 기계적 손상과 같은 양상을 보이지만 차이점이라면 과충전의 경우 SOC가 100% 이상이기 때문에 전극 근처의 이온 농도가

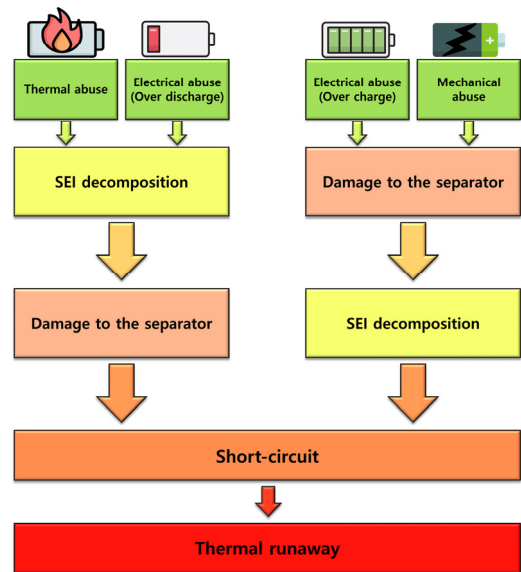


Fig. 4. Two distinct thermal runaway pathways of lithium-ion battery based on the reaction order.

매우 높은 상태이다. 이는 높은 반응율을 야기하기 때문에 더 많은 발열량을 갖을 가능성이 있다. 마지막으로 열적 손상의 경우 과방전과 유사한 메커니즘을 갖는다. Chomboa 외[19]의 연구에 의하면 80°C 이하에서 리튬 이온 배터리의 SEI가 분해되고 135°C 이하에서 분리막이 분해된다고 한다. Wang 외[20]에 의하면 SEI의 분해 과정에서 음이온이 생성된다. SEI의 분해는 전극과 전해질이 직접적으로 접촉하여 화학 반응을 일으켜 배터리 열폭주의 트리거가 되어 Fig. 5와 같이 연쇄적으로 반응이 일어난다. 이는 곧 분리막이 분해된 시점부터는 리튬 양이온 뿐만 아니라 음이온 역시 섞여 전류의 크기가 높아져 높은 줄 히팅인 내부 단락이 발생함을 의미한다. SEI의 분해와 애노드-전해질 반응은 발열 반응으로 SEI의 분해 이후로 온도가 꾸준히 상승하지만 흡열 반응인 분리막의 분해가 시작되면서 온도가 미세하게 잠시 낮아진다. 하지만 분리막이 분해되어 단락의 발생과 함께 급격하게 온도가 상승한다. 이때 급격하게 전압이 낮아지는 현상이 있어[21] 이를 통해 내부 단락의 유무를 구분하기도 한다. 배터리의 발열모델의 에너지 보존식을 구성함에 있어 주의할 점이 있다. 식 (10)의

우항의 3번째 항에 해당하는 온도에 의해 반응하는 화학 반응은 발열 반응인 SEI 분해와 흡열반응인 분리막의 분해를 구분해 줘야 한다. 우항의 4번째 항인 전기화학 반응은 각 전극에서 발생한다.

### 2.2.2 전기 제어 추력발생 개념

ECSP는 외부 전압을 통해 전기 에너지를 화학 에너지로 변환하여 작동하여 추력을 얻는 전기화학 시스템이다. ECSP는 고체상태이기 때문에 전극과 맞닿아 있는 부분에서부터 반응이 시작된다. 대부분의 다른 전기화학 시스템과 달리 액화가 되지 않은 부분에서는 전자가 직접 이동하게 되며 액화가 시작된 부분에 맞닿은 고체상태의 ECSP는 그 자체로 전극의 역할을 하게 된다. 하지만 ECSP의 고체 영역은 이온의 이동이 활발하지 않아 전기화학 반응이 발생하기 어렵다. 그렇기 때문에 전극 사이에 먼저 액체 층이 형성된 후 활발한 반응과 함께 점화가 이루어진다. ECSP의 가장 큰 특징이라고 하면 많은 타 전기화학 시스템과 달리 양이온과 음이온이 모두 자유롭게 이동이 가능하다는 점이다. 그렇기 때문에 분리막이 파괴된 배터리의 충전 과정과 같은 메커니즘을 갖게 된다. ECSP의 발화 과정에 있어 특별한 메커니즘이 존재한다. 잘 알려져 있듯이 자유 전자는 액체 상태에서는 이동이 거의 불가능하다. 또한 이온 역시 고체 상태에서는 이동이 어렵다. ECSP의 발화 과정은 세 가지 단계를 거치게 된다. 첫 번째로 고체상태의 추진제에 외부 전압을 걸어주게 되면 전자에 의한 전류가 흐르게 된다. 줄 히팅에 의해 추진제 전체의 온도가 동일하게 상승하면서 전극에서는 전기화학 반응이 발생한다. 전기화학 반응을 통한 열에 의해 고체 상태의 추진제는 용해하여 액체 상태로 변화한다. 이때, 두 전극 중 한 곳에서 선택적으로 액화가 진행된다. 그러면 Fig. 6에 표

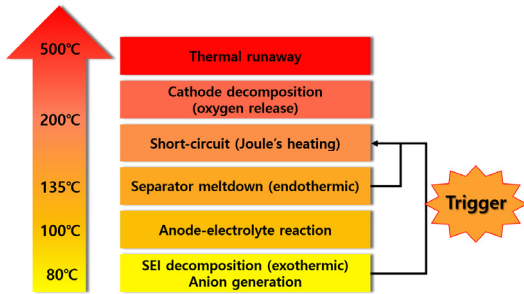


Fig. 5. Thermal runaway process according to temperature during thermal abuse.

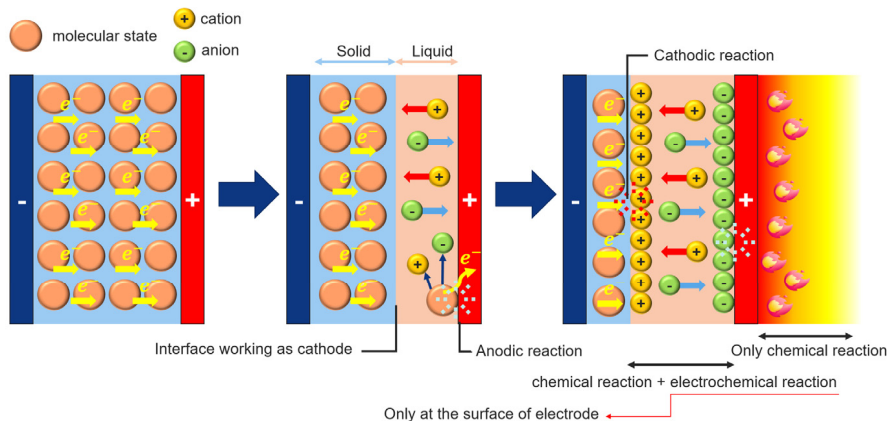


Fig. 6. Ignition mechanism of an electrically controlled solid propellant.

현된 것과 같이 한 개의 전극과 용해되지 않은 고체 상태의 추진제가 각각 전극의 역할을 하게 되고 액체 상태의 추진제 내부에서는 전기화학 반응에 의해 발생한 양이온과 음이온이 이동하며 전류가 흐르게 된다. 액화된 추진제 내부에서는 이온의 이동이 활발하기 때문에 전기화학 반응 역시 가속화되어 더 많은 열을 발생시킨다. 전기화학 반응에 의해 기체 방출 형태로 발생한다. 가연성 기체와 산화제는 충분한 온도에 도달하면 화학 반응을 하며 연소를 시작한다. ECSP는 이미 전기를 이용해 제어가 가능한 고체 연료라는 장점을 갖고 있다. 발열량 제어가 가능하다면 간단한 제어가 가능한 추진제로써 앞으로 우주분야 첨단 추진기 관개발에 있어 중요한 역할을 하게 될 것이다.

### 3. 전기화학 시스템 응용

#### 3.1 전기화학 시스템 구축

전기화학시스템은 작동 상태나 종류에 따라 지배방정식의 구성이 달라진다. 전류가 흐를 때 실제로 이온이나 전자가 이동하는 거리는 매우 짧다. 그렇기 때문에 빛에 속도에 가까운 신호 전달 능력을 갖게 된 것이다. 이 때문에 실제 유체의 흐름이 없는 상태의 전기화학시스템에서는 대류항을 소거하여 사용하게 된다. 예를 들어 배터리의 내부를 살펴보자면 전해질이 흐를 수 있는 형태가 아닌 솜을 적신 형태로 존재한다. ECSP 역시 얇은 액체막을 형성하면서 반응이 시작되기 때문에 대류에 의한 영향은 작다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 화학 반응의 참여 여부와 대류의 참여 여부에 따라 연속방정식, 운동량 보존 식, 에너지 보존 식, 네른스트-플랭크 식의 형태를 구분하였다.

첫번째 케이스로 대류의 영향이 매우 작고 온도가 낮아 화학 반응이 없는 경우의 전기화학 시스템의 지배방정식을 구성한다. 이 경우는 정상 작동하는 배터리의 충전과 방전을 예로 들 수 있다. 충전과 방전의 차이는 경계 조건 (boundary condition)의 전위 설정에 의해 결정된다. 정상 작동하는 배터리의 경우 분리막에서는 리튬 이온만이 존재 가능하기 때문에 나머지 화학종의 농도는 분리막 내부에서 0으로 설정하여야 한다. 또한 속도가 0이라는 가정을 하기 때문에 운동량 보존식은 사용하지 않는다. 에너지 보존식의 생성항에는 줄 발열과 전기화학반응 열이 고려되며, 네른스트-플랭크식에서 생성항은 전기화학반응에 의한 생성 또는 소멸만을 고려한다. 밀도와 몰농도의 관계는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있으며 지배방정식인 연속방정식, 에너지 보존 식 그리고 네른스트-플랭크 식은 식 (19)-(21)로 나타내어진다.

$$\rho = \sum_i c_i M_i \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q}_{Joul} + \sum_j (\nu_{e,j} \Delta H_{e,j}) \quad (20)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -z_i \frac{D_i}{RT} F c_i \nabla \phi - D_i \nabla c_i \right) = \dot{c}_i \quad (21)$$

두번째 케이스는 대류의 영향이 매우 작지만 온도가 높아 화학 반응이 발생하는 경우이다. 80°C 이상의 배터리에서는 SEI막의 화학적 분해가 시작된다. 또한 135°C에 도달하면 분리막의 화학적 분해가 발생하여 분리막이 사라지면서 모든 화학종의 농도가 0이 아니게 된다. 하지만 이 경우는 열폭주가 발생하기 전 즉, 연소가 발생하기 전 까지만 해당한다. 또 다른 예로 화염이 발생하기 전의 ECSP도 여기에 해당한다. 마찬가지로 속도가 0이라는 가정하에 지배방정식은 식 (22)-(24)로 나타내어진다. 첫번째의 경우와 달리 에너지 보존식의 생성항에 화학반응에 의한 열이 추가 되었으며, 네른스트-플랭크 식의 생성항은 전기화학반응과 화학반응에 의한 화학종의 생성과 소멸을 모두 고려한다.

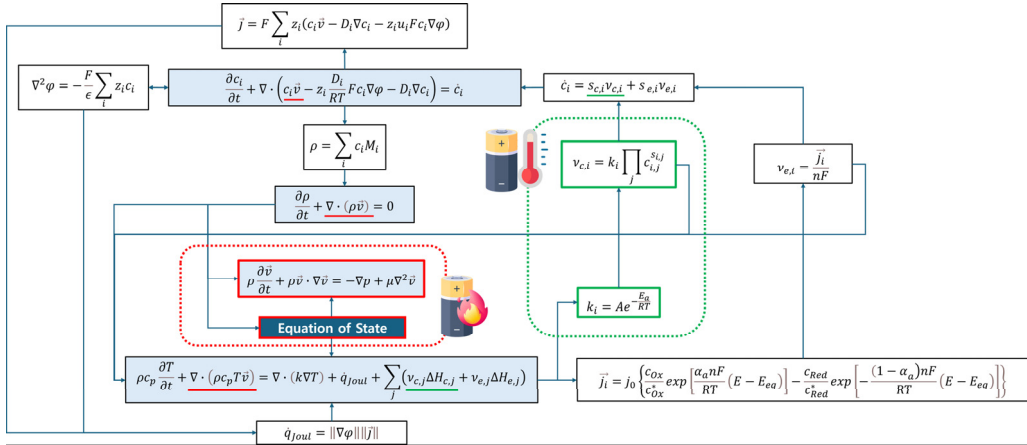
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q}_{Joul} + \sum_j (\nu_{e,j} \Delta H_{e,j} + \nu_{c,j} \Delta H_{c,j}) \quad (23)$$

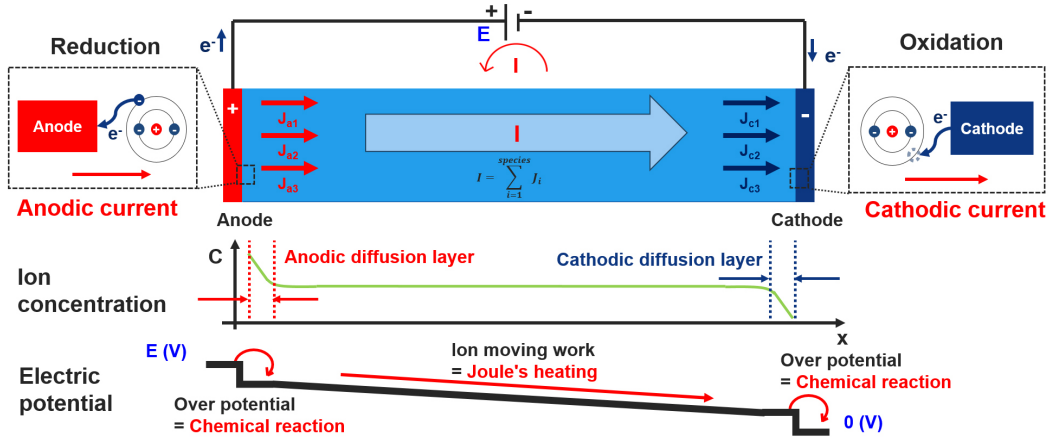
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -z_i \frac{D_i}{RT} F c_i \nabla \phi - D_i \nabla c_i \right) = \dot{c}_i \quad (24)$$

마지막의 케이스는 대류항이 고려된 빠른 유동이 포함 된 케이스이다. 연료전지와 같이 유동을 이용하는 경우나 열폭주가 발생한 배터리, 연소가 시작된 ECSP가 여기에 해당한다. 앞의 두 케이스와 다르게 운동량 보존식이 고려 되기 때문에 적절한 상태방정식을 선택하여 사용하는 것이 중요하다. 두번째 케이스와 마찬가지로 화학반응과 전기화학반응 모두를 고려하고 있으며 식 (25)-(28)로 표현 된다. Fig. 7는 세가지 케이스에 대한 지배방정식 구성 모 식도이다.





**Fig. 7.** Relationship diagram of governing equations. Green borders and underscores are added in high-temperature environments where chemical reactions take place, while red borders and underscores are added where convective terms dominate when combustion reactions begin.



**Fig. 8.** Description of a Nernst diffusion layer.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (25)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (26)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T \vec{v}) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \dot{q}_{Joul} + \sum_j (v_{e,j} \Delta H_{e,j} + v_{c,j} \Delta H_{c,j}) \quad (27)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( c_i \vec{v} - z_i \frac{D_i}{RT} F c_i \nabla \phi - D_i \nabla c_i \right) = \dot{c}_i \quad (28)$$

### 3.2 전압과 발열량의 선형성

네른스트 확산층 이론은 전기화학 시스템의 최대 전류를 정의할 수 있다. 전극 근처에서의 이온의 농도는 두 전극 근처의 확산층 안에서 전극에 가까워질수록 한쪽 전극에서는 증가하는 구배, 반대쪽 전극에서는 감소하는 구배를 나타낸다. 이때 감소하는 구배를 나타내는 농도의 최솟값 즉 전극과 가장 가까운 위치에서의 농도가 0이 될 때 반대쪽 전극 근처에서의 농도는 최대가 된다. 이 상태를 ‘포화점’이라고 부른다. 포화점에 도달하면 외부 전압이 증가해도 농도 구배가 일정해졌기 때문에 전류의 양이 변화하지 않는다. 이는 달리 말하면 반응률이 일정해진다라는 뜻과도 같다. 확산층 안에서는 확산이 지배적이기 때문에 식 (19)과 같이 전류를 표현할 수 있다. 이 때 두 전극에서의 농도 기울기는 Fig. 8과 같이 동일하다.

$$\vec{j}_i = z_i F \left\{ -D_i \left( \frac{c_{c,i} - c_{0,i}}{\delta_{c,i}} \right) \right\} \quad (29)$$

포화점에 도달한 후에는 전극 근처의 일정한 농도로 인하여 반응률 역시 일정하므로 발열량도 일정해야 한다. 그러나 이러한 안정성은 줄 발열의 영향을 배제하였을 때이다. 일단 포화점에 도달하면 전압을 증가시켜도 전류는 일정하게 유지된다. 줄 히팅 식 (14)에 의하면 전류가 일정할 때 전압과 발열량은 정비례한다. 이는 전기화학 시스템에서 전압을 이용한 발열을 특정 전압 이상으로 선형적으로 제어할 수 있음을 시사한다. 리튬 이온 배터리와 같은 다공성 구조에는 네른스트 확산층 이론이 직접 적용되지 않을 수 있지만, 버틀러-볼머 방정식을 이용해 비슷한 접근을 해 볼 수 있다. 식 (20)은 버틀러-볼머 방정식을 간소화한 타펠(Tafel) 방정식과 식 (29)의 계수들을 단순화한 네른스트 확산층 이론에 의한 평형 식이다. 실제로 산화-환원 반응은 한쪽이 더 우세하게 발생하기 때문에 두 항 중 하나를 소거할 수 있다. 이렇게 유도된 식이 타펠 방정식이다. 기준 농도와 벌크 농도가 같다는 가정하에 식 (30)에서 전극 표면의 농도를 소거하여 식 (31)을 얻을 수 있다 [22].

$$\vec{j}_i = z_i F k_{m,i} (c_{0,i} - c_{c,i}) \quad (30)$$

$$= j_{0,i} \left\{ \frac{c_{c,i}}{c_{0,i}} \exp \left[ \frac{\alpha_{a,i} n_i F}{RT} (E - E_{eq}) \right] \right\}$$

$$\vec{j}_i = \frac{1}{\frac{1}{z_i F k_{m,i} c_{0,i}} + \frac{1}{j_{0,i} \exp \left[ \frac{\alpha_{a,i} n_i F}{RT} (E - E_{eq}) \right]}} \quad (31)$$

**Table 1.** Properties for the calculation of heat release of electrochemical systems

$E_{eq}$	3
$k_{m,1}, k_{m,2}, k_{m,3}$	50
$c_{0,1}, c_{0,2}, c_{0,3}$	0.1, 0.5, 1
$z_1, z_2, z_3$	1
$n_1, n_2, n_3$	1
$j_{0,1}, j_{0,2}, j_{0,3}$	0.42, 0.8, 1.2
$\alpha_{a,1}, \alpha_{a,2}, \alpha_{a,3}$	0.4, 1.2, 2
$T$	298
$\Delta H_{e,1}, \Delta H_{e,2}, \Delta H_{e,3}$	$1.0364 \times 10^{-4}$

식 (31)을 이용해 전극 표면에서의 농도를 몰라도 각 전압에서 발생 가능한 최대 전류를 구할 수 있다. 전압과 전기화학시스템의 발열량의 관계를 알아보기 위해 식 (32)와 같이 줄 발열과 전기화학 반응이 고려된 발열량 식을 구성하였다. 여기서 화학반응에 의한 영향을 무시하기 위해 가열 속도와 냉각 속도가 같은 등온 조건을 가정하였다. 한개의 전기화학반응이 존재하는 단일 케이스와 세개의 전기화학반응이 존재하는 다중 케이스로 두개의 케이스에 대하여 계산을 하였다. 이 때 사용된 변수들은 Table 1에 정리되었으며 단일 케이스는 아래 첨자 1이 사용된 변수들을, 다중 케이스는 아래 첨자 1, 2, 3이 사용된 변수들 모두가 사용되었다.

$$\dot{q} = \|\nabla \phi\| \|\vec{j}\| + \sum_j (\nu_{e,j} \Delta H_{e,j}) \quad (32)$$

식 (31)에서 외부 전압이 무한이 될 때 식 (29)와 동일해짐을 알 수 있다. 즉 한계 전류가 존재한다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 단일 케이스와 다중 케이스의 외부 전압 변화에 대

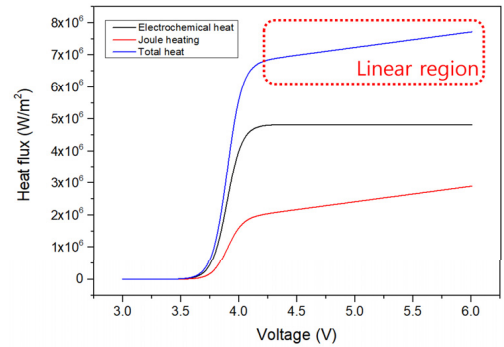


Fig. 9. Heat released during a single electrochemical reaction.

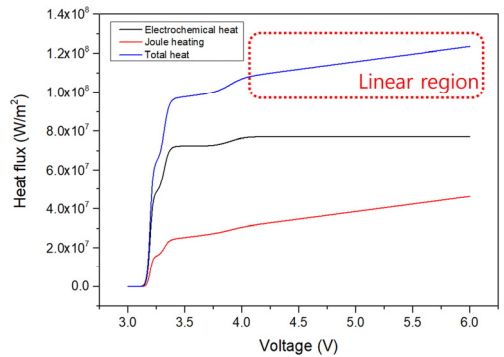


Fig. 10. Heat released during multiple electrochemical reactions.

한 줄 발열, 전기화학반응에 의한 열 그리고 총 발열 그래프이다. 단일 케이스의 그래프에서 알 수 있듯이 포화점 이후로는 전기화학반응에 의한 열이 증가하지 않기 때문에 줄 발열이 선형적으로 증가하게 되어 총 발열량은 전압에 의해 선형 제어가 된다.

이는 다중 케이스에서도 마찬가지로의 결과가 나온다. 즉, 전기화학반응의 개수나 종류에 상관없이 등온조건에서는 특정 전압 이상에서 총발열량과 외부 전압은 선형 관계를 갖게 되며 이는 선형 제어 가능성을 갖기 때문에 매우 중요한 정보이다.

### 3.3 리튬 이온 배터리 열폭주 추력 엔진

리튬 이온 배터리는 열폭주시 다량의 가연성 기체와 산소를 방출하며 연소한다. 열폭주 과정 중 90°C~120°C에서 애노드의 리튬 분자와 전해질 사이에 식 (33)와 같은 화학반응이 발생하여 산소와 에틸렌이 합성된다[23]. 반면 전해질인 탄산 에틸렌은 아주 높은 반응성을 갖는 물질로 식 (34)와 같이 산소와 연소 반응을 일으킬 수 있다. 식 (33)의 역할을 알아보기 위해 식 (35)를 구성하여 NASA CEA를 통해 비율 x에 따른 단열과정 온도를 측정하고 비추력을 측정하여 추진 장치로써 성능을 평가하였다. x가 1에 가까울수록 식 (33)의 반응이 많이 발생했음을 의미한다. NASA CEA에 의해 0차원 해석이 이루어졌기 때문에 배터리의 모든 위치를 균일하게 가열한 상황을 가정할 수 있다. 표준 로켓 조건인 70 bar 압력과 노즐확장비 10에서의 비추력이 측정되었으며, 식 (33)의 반응이 발생하는 90°C를 초기 조건으로 설정하였다. 각 화학종의 특성 값들은 NASA CEA 내장 라이브러리를 사용하였으며 탄산 에틸렌의 특성 값은 Choi 외[24]의 연구를 참고하였다.

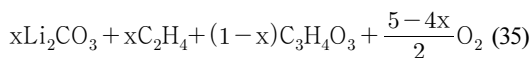
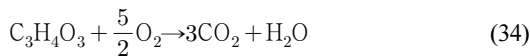
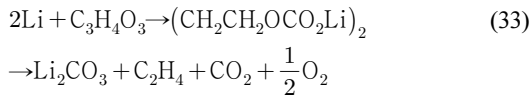


Fig. 11의 결과와 같이 식 (33)의 반응이 많이 존재할수록 단열 온도와 비추력이 낮아졌다. x=1에서는 연소 반응이 발생하지 않았다. 즉, 연소 온도를 낮추기 위해서는 식 (33)의 반응을 최대한 유도해 반응성이 높은 탄산 에틸렌

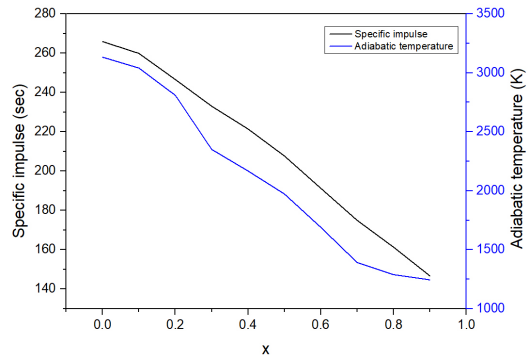


Fig. 11. Specific impulse and adiabatic temperature during thermal runaway of lithium-ion batteries according to x value. x represents the participation rate of Equation (33) in Equation (35).

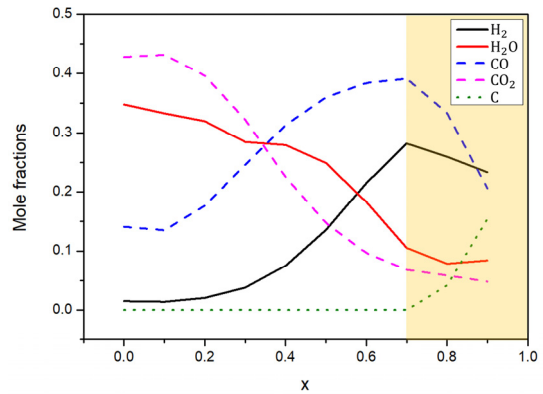


Fig. 12. Mole fraction of products during thermal runaway of lithium-ion batteries according to x value. The yellow zone on the right is the section where carbon dust is generated.

을 소모 시켜야 한다. 반면 추력기로서 사용하기 위해서는 오히려 식 (33)의 반응이 많이 이루어지기 전에 온도를 상승시켜 탄산 에틸렌과 산소의 반응을 유도하여야 높은 비추력을 얻을 수 있다. 또한 x 값에 따라 생성물의 조성 역시 변화하였다. x값이 0.7이하 일 때는 x값을 증가시키면 수소와 일산화탄소의 몰분율이 증가하였으며, 수증기와 이산화탄소의 양이 감소하였다. 즉 식 (33)의 반응이 많이 발생할수록 배터리 화재시 일산화탄소 증독과 수소 폭발에 의한 이차 피해 발생 가능성이 생긴다. 하지만 Fig. 12의 오른쪽 노란색 구간에 표현되었듯이 x값 0.7이상에서는 x값의 증가에 따라 모든 생성물의 몰분율이 감소하지만 탄소 분진의 발생이 급격히 상승한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 리튬 이온 배터리의 열폭주 현상 및 전기화학 시스템의 연소 과정을 이론적으로 탐구하였다. 이를 위해 전기화학 시스템의 다양한 운영 조건을 분석하고, 이론적 모델을 구축하여 응용 가능성을 평가하였다.

세 가지 주요 시나리오를 제시하여 전기화학 시스템을 이론적으로 구축하였다. 첫 번째 시나리오는 대류의 영향이 없는 상황에서의 전기화학 시스템을 모델링하여 지배 방정식을 도출하였다. 두 번째 시나리오에서는 온도가 상승하여 화학 반응이 발생하는 경우를 분석하였으며, 전기화학 반응과 화학 반응이 동시에 일어나는 복합 시스템의 열 발생 메커니즘을 상세히 탐구하였다. 마지막으로, 대류가 포함된 상황을 모델링하여 고속 반응 시스템에서의 열 발생과 에너지 변환 메커니즘을 제시하였다.

전압과 발열량 간의 선형 관계를 분석한 결과, 포화점에 도달한 이후 전기화학 반응에 의한 열 발생이 일정하게 유지되며, 줄발열이 전압에 대하여 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 선형성은 전기화학 시스템에서 전압을 이용해 발열을 제어할 수 있는 중요한 가능성을 시사하며, 이는 열폭주 현상을 활용한 추진 시스템의 설계에 매우 중요한 기초 자료가 된다.

마지막으로 리튬 이온 배터리의 열폭주를 활용한 추진 장치의 가능성을 평가하였다. 특히, 열폭주 과정에서 발생하는 가연성 기체와 산소의 연소 메커니즘이 강력한 추력을 제공할 수 있음을 강조하였다. 리튬과 전해질 간의 화학 반응을 통해 발생하는 산소와 에틸렌의 비율이 비추력에 결정적인 영향을 미치며, 이러한 연소 반응을 효과적으로 제어함으로써 우주 쓰레기의 탈궤도와 같은 우주 환경에서의 응용 가능성이 확인되었다. 연소 메커니즘의 이해는 이러한 추진 시스템이 우주 산업에서 새로운 형태의 전기화학 추진 기술로 발전할 수 있는 기반을 제공한다.

결론적으로, 본 연구는 리튬 이온 배터리의 열폭주 현상을 활용한 전기화학 추진 시스템의 이론적 가능성을 체계적으로 검토하였으며, 전압 제어와 연소 메커니즘을 통한 발열량 제어의 선형성을 통해 실용적 응용 가능성을 제시하였다. 향후 연구에서는 이러한 이론적 모델을 바탕으로 실험적 검증을 수행하고, 실용화를 위한 구체적인 설계와 테스트를 통해 이 기술의 우주 산업에서의 응용을 가속화할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단의 기초연구지원사업(RS-2024-00357969)의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

## References

- [1] E.J. Nemanick, J.D. DeSain, A. G. H. Schouten, B.B. Brady, J.H. Schilling, A.C. Cortopassi, Lithium ion battery de-orbiter, US Patent 11,713,140 B2., filed Jun 11, 2020, and issued Aug 01, 2023.
- [2] R.G. Kelly, Electrochemical techniques in corrosion science and engineering, Marcel Dekker, 2003, 9-10.
- [3] J. Newman, K.E. Thomas-Alyea, Electrochemical systems, Wiley, 2021, 5-6.
- [4] G.W. Crabtree, M.S. Dresselhaus, M.V. Buchanan, The hydrogen economy, Physics Today, 57(12) (2004) 39-44.
- [5] Ö. Akay, A. Bashkatov, E. Coy, K. Eckert, K.E. Einarsrud, A. Friedrich, B. Kimmel, S. Loos, G. Mutschke, L. Röntzsch, M.D. Symes, Electrolysis in reduced gravitational environments: current research perspectives and future applications, NPJ Microgravity, 8(1) (2022) 56.
- [6] R.R. Gonzales, A. Abdel-Wahab, S. Adham, D.S. Han, S. Phuntsho, W. Suwaileh, N. Hilal, H.K. Shon, Salinity gradient energy generation by pressure retarded osmosis: A review, Desalination, 500 (2021) 114841.
- [7] J.Y. Xu, J. Ma, X. Zhao, H. Chen, B. Xu, X.Q. Wu, Detection technology for battery safety in electric vehicles: A review, Energies, 13(18) (2020) 4636.
- [8] R. Borah, F.R. Hughson, J. Johnston, T. Nann, On battery materials and methods, Materials Today Advances, 6 (2020) 100046.
- [9] B. Gobin, N. Harvey, G. Young, Combustion characteristics of electrically controlled solid propellants using polymer electrolytes, Combust. Flame, 244 (2022) 112291.
- [10] U.P. Padhi, J. Oh, A. Mehrotra, Y. Lee, J.J. Yoh, A predictive theory on thermal runaway of ultrahigh capacity lithium-ion batteries, Combust. Flame, 258 (2023) 113116.
- [11] J. Oh, A. Mehrotra, Y. Lee, B. Kim, J.J. Yoh, Thermal runaway aspect of ultrahigh-nickel cathode-based lithium-ion batteries at increasing charge states, Journal of Energy Storage, 76 (2024) 109887.
- [12] K. Gnanaprakash, J.J. Yoh, Understanding the pyroelectric combustion behaviour of metallized electrically controlled solid propellants, Proc. Combust. Inst., 39(4) (2023) 5677-5686.

- [13] K. Gnanaprakash, D. Lim, J. J. Yoh, Combustion characteristics of lithium perchlorate-based electrically controlled solid propellants at elevated pressures, *Thermochimica Acta*, 720 (2023) 179421.
- [14] D. Lim, K. Gnanaprakash, R. Rajak, J.J. Yoh, Combustion behavior of electrically controlled solid propellant with tungsten additive, *Thermochimica Acta*, 727 (2023) 179562.
- [15] A.J. Bard, L.R. Faulkner, H.S. White, *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*, Wiley, 1970, 43.
- [16] M.A. Rosen, A. Farsi, *Battery Technology: From Fundamentals to Thermal Behavior and Management*, Elsevier, 2023, 69.
- [17] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He, Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review, *Energy Storage Materials*, 10 (2018) 246-267.
- [18] J. Xu, M. Jian, Z. Xuan, C. Hao, X. Bin, W. XueQin, Detection technology for battery safety in electric vehicles: A review, *Energies*, 13(18) (2020) 4636.
- [19] P.V. Chomboa, Y. Laonual, A review of safety strategies of a Li-ion battery, *Journal of Power Sources*, 478 (2020) 228649.
- [20] A. Wang, S. Kadam, H. Li, S. Shi, Y. Qi, Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries. *NPJ Computational Materials*, 4(1) (2018) 15.
- [21] Xuning Feng, Mou Fang, Xiangming He, Minggao Ouyang, Languang Lu, Hao Wang, Mingxuan Zhang, Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry, *Journal of Power Sources*, 255 (2014) 294-301.
- [22] T.F. Fuller, J.N. Harb, *Electrochemical Engineering*, Wiley, 2018, 54-55.
- [23] J.C. Hewson, S. P. Domino, Thermal runaway of lithium-ion batteries and hazards of abnormal thermal environments, No. SAND2015-3080C. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015.
- [24] J.K. Choi, M.J. Joncich, Heats of combustion, heats of formation, and vapor pressures of some organic carbonates. Estimation of carbonate group contribution to heat of formation, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 16.1 (1971) 87-90.

## 저자정보



### 김민석

김민석은 서울대학교 항공우주공학과 석사과정이며, 관심분야는 전기화학 시스템 연소 매커니즘 해석 및 연소모델링이다.



### 라젠드라 라작

라젠드라 라작은 서울대학교 항공우주공학과 박사과정이며, 관심분야는 레이저 진단, 고체 연료의 고속 이미징, 고체 추진제 연소 및 금속 연소이다.



### 임대홍

임대홍은 서울대학교 항공우주공학과 박사과정이며, 관심분야는 연소 진단, 동적 화염 특성 및 고체 연료 연소이다.



### 여재익

여재익은 서울대학교 항공우주공학과 교수이며, 관심분야는 연소/추진 공학 및 2차전지 열폭주 연구이다.