

고출력 열전지용 후막 양극 제조 및 전기화학적 특성평가

안원준 

국방과학연구소 제3기술연구원 6부

Fabrication and Evaluation of Electrochemical Properties of Film Cathode for High-Power Thermal Battery

Wonjun Ahn

3rd R&D Institute 6th Directorate, Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

(Received April 29, 2025; Revised May 27, 2025; Revised May 30, 2025; Accepted May 30, 2025)

Abstract: Thermal batteries are designed to activate at high temperatures (~500°C), therefore, the electrodes used in these systems are typically made into pellet form using compression molding techniques that do not involve polymer binders. However, the compression molding technique poses limitations in scaling up the electrode area without increasing thickness for high-power properties. Additionally, the tape casting method has been studied as a way to solve with, but too low a loading level is still an obstacle to practical use. This study fabricated a film cathode of high loading level (35.79 mAh·cm⁻²) using the tape casting method for these problem. As utilized fabricated cathode, it investigated the influence of electrode thickness and density on electrochemical performance. Furthermore, a film cathode with a larger area but the same amount of active material as the pellet was fabricated, enabling the design of high-power cells with the same energy density. We expect that the fabricated film cathode with a high loading level and scalable area will enable the development of various thermal battery designs.

Keywords: Film cathode, Thermal battery, Tape casting, Areal capacity

1. 서론

열전지(Thermal battery)는 열에 의해 활성화되는 비축형 전지로 평상시 비활성 상태를 유지하며, 필요 시 내부 열원으로 고체 상태의 전해질을 용융시켜 작동한다. 따라서 열전지는 장기 보관이 가능하고, 높은 출력 특성으로 무기체계(미사일, 어뢰 등)의 전원으로 활용되고 있다. 또한 최근에는 전투기의 비상전원, 탈출용 사출 전원으로도 사용처가 점차 확대되는 추세이다. 이러한 응용 분야가 확대

됨에 따라 다양한 크기의 열전지가 요구되고 있으나, 현재 사용되고 있는 열전지의 전극 제조 방식은 이러한 요구조건을 반영해서 제조하기에 어려움이 있다 [1].

현재 열전지 전극은 가압방식을 이용한 분말성형법을 사용하여 펠릿(Pellet)형태로 제조되고 있다. 이러한 방법은 성형성 및 취급성 확보를 위하여 전극 크기에 따라 필요한 최소 전극 두께가 요구된다. 따라서 높은 출력 특성이 요구되어 전극의 대면적화가 필요할 경우 전극의 중량 및 두께가 증가하게 되며, 이러한 문제는 요구되는 열원과 전지 케이스의 크기 증가 등 궁극적으로 열전지의 에너지밀도를 감소시키는 요인이 된다 [2]. 또한, 열전지의 중량 및 부피 증가는 열전지 작동 신호 인가 후 고체전해질이 용융되는 시간을 증가시키므로 열전지 활성화 시간을 지연시키게 된다 [3].

✉ Wonjun Ahn; ahnwj94@add.re.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 열전지 전극 제조방법의 문제점을 해결하기 위하여 테이프 캐스팅을 적용한 전극 제조에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 일반적으로 테이프 캐스팅은 고분자 바인더를 적용하여 전극을 후막 형태로 제조함으로써 연속 공정을 통한 대량 생산과 대면적화 및 전극의 두께 조절이 용이하다. 그러나 고분자 바인더의 사용은 열전지의 높은 작동온도(500°C 이상)에서 가스 발생 및 부반응을 발생시킨다. 또한, 슬러리(Slurry)를 제조시 사용되는 용매와 전극 재료의 반응성, 슬러리 점도, 집전체와의 접착성 등 다양한 조건들을 추가로 고려해야 할 필요성이 있다. 이를 해결하기 위하여 열적 안정성이 높은 바인더를 활용하거나 고분자 바인더를 제거하는 등 다양한 방법들이 기존의 연구에서 수행되었다 [4-9]. 이러한 노력에도 불구하고 테이프 캐스팅 방법은 실제 사용되는 열전지 전극제조에 적용하기에는 어려움이 있다. 열전지의 에너지 밀도와 출력 밀도를 확보하기 위해서는 앞서 언급한 펠릿의 두께보다는 얇지만 후막 전극의 두께도 일정 두께 이상 확보되어야 하기 때문이다.

대부분 연구들은 고분자 바인더를 활용하여 캐스팅 후 열처리를 통하여 바인더를 최소한으로 잔류시키는 방법을 사용하여 얇은 두께의 전극을 제조하였다 [5-9]. 이러한 방법은 전극의 두께가 높아질수록 전극의 형상유지에 어려움이 있기 때문에, 대부분의 연구들은 얇은 두께로 전극을 제조하여 평가하였다. 또한, Yoon 등의 연구는 바인더를 사용하지 않았지만, 동일한 문제로 얇은 전극을 제조하였다 [4].

본 연구에서는 분말성형법의 펠릿 전극으로는 제조가 어려우며 고분자 바인더를 사용하지 않고, 기존 연구들보다 전극 두께를 높인 후막 양극을 제조하고자 한다. 후막 양극은 펠릿 전극에 사용되는 산화마그네슘(Magnesium oxide, MgO) 및 이산화규소(Silicon dioxide, SiO₂)를 바인더로서 사용하였고, 물과 에탄올을 혼용하여 용매로 적용하였다. 또한 집전체의 표면 처리를 통하여 전극과 집전체의 접착성을 향상시켜 높은 로딩량을 갖는 전극을 제조하였다. 제조된 후막 전극과 펠릿 전극의 전기화학적 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극 제조

양극 활물질은 FeS₂ (Sigma Aldrich, 99.8%, -325 mesh)를 사용하였으며, 음극 활물질은 Li(Si) (Lithium

silicon, GRINM, 99%)을 사용하였다. 전해질은 Lithium Chloride (LiCl, Sigma Aldrich, 99%)와 Potassium Chloride (KCl, Sigma Aldrich, 99%) 공용염을 사용하였다. 바인더는 Magnesium oxide (MgO, Sigma Aldrich, 99%, -325 mesh)와 슬러리의 점도 조절을 위한 Silicon dioxide (SiO₂, Cabot, M5 Fumed silica)를 사용하였다.

전극의 전체 제조 과정은 그림 1에 간단하게 나타내었다. 양극 슬러리는 활물질 91.4 wt%, MgO 8.2 wt%, SiO₂ 0.4 wt%의 비율로 혼합하였으며, 용매는 증류수(deionized water)와 에탄올(Ethanol, Daejung, 99.9% Anhydrous)의 혼용 비율을 조절하며 사용하였다. 제조된 슬러리 캐스팅을 위한 집전체로서 흑연시트(Graphite sheet, G&CS, GT-010, carbon >99%, 100 μm)를 사용하였다. 특히, 집전체와 전극의 접착성을 향상시키기 위하여 흑연시트의 최상위층을 박리함으로써 물리적 표면처리를 수행하였다. 양극 분말의 혼합 및 슬러리의 제조는 공자전 혼합기(Thinky mixer, ARV-310)를 사용하였다. 우선적으로 전극 활물질과 바인더 등 분말들을 혼합하였고, 이후 용매를 첨가하여 슬러리를 제조하였다. 완성된 슬러리는 표면 처리된 흑연 집전체에 닥터 블레이드(doctor blade)를 이용하여 다양한 두께로 도포하였다. 도포된 전극은 상온에서 24시간 건조 후, 진공 오븐으로 80°C에서 12시간 건조하여 용매를 완전히 제거하였다. 건조된 전극은 롤프레스로 압연을 하여 밀도를 조절하였다.

제조된 전극은 지름 39.5 mm의 원형으로 타발하여 양극으로 사용하였다. 또한 기존에 사용되는 전극과의 비교를 위하여 동일한 크기의 펠릿형 양극을 제조하였다. 펠릿 형태의 양극은 활물질 이외에 추가적으로 성형성 및 이온 전도도 개선을 위하여 MgO와 LiCl-KCl 공용염을 첨가하였고, 전극 활물질에 포함된 불순물들로 인한 초기 전압 스

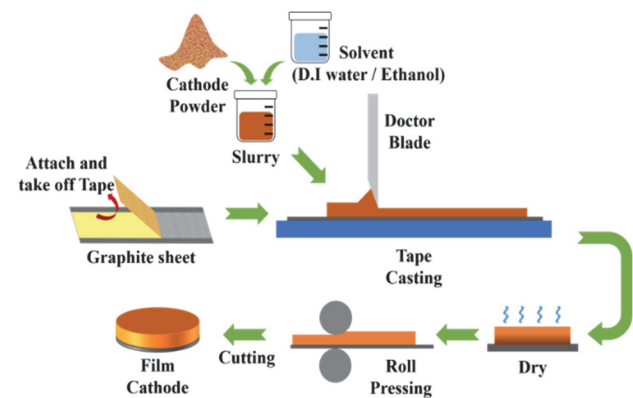


Fig. 1. Schematic diagram of fabrication film cathode.

파이크를 방지하기 위하여 Li₂O (Lithium oxide, Sigma Aldrich, 97%, -60 mesh)를 혼합하여 제작하였다 [2]. 후막 전극에는 용매와의 반응성을 고려하여 Li₂O를 사용하지 않았다. 전해질은 LiCl-KCl 공용염을, 음극은 Li(Si) 활물질을 사용하여 지름 40 mm의 펠릿으로 제작하였다. 펠릿 형태의 전극과 전해질은 가압성형법을 사용하여 제조하였다.

2.2 전기화학적 특성 평가

전극의 전기화학적 특성평가를 위하여 양극, 전해질 및 음극을 적층하여 집전체와 리드단자를 연결해서 단전지를 조립하여 방전시험을 수행하였다. 조립한 단전지는 500°C 핫 프레스(hot press)를 이용하여 12.25 Kgf · cm⁻²로 가압하고, 전해질의 용융을 위하여 1분 대기 후, 0.2 A · cm⁻² 4s 0.4 A · cm⁻² 2s, Rest 2s로 펄스 방전을 실시하였다. 방전은 전압이 약 0.5 V에 도달 후 종료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 후막 양극 제조

양극 슬러리 제조에 사용한 용매인 증류수와 에탄올의 용매 혼용 비율 및 고형분 등을 표 1에 정리하였고, 제조된 전극 사진을 그림 2에 나타내었다. 전극의 크랙 발생을 억제하기 위하여 바인더 대비 전체 용매의 함량을 최소화하여 동일한 점도를 갖는 슬러리를 제조하였다. 도포 후 건조된 전극은 그림 2와 같이 에탄올의 비율이 낮아질수록 균열(crack)이 감소하였으며, 에탄올의 비율이 16 wt%일 때 표면의 균열이 발생 없이 안정적으로 제조되었다. 그러나, 에탄올을 사용하지 않고 증류수만 사용할 경우, 그림 2(e)와 같이 핀홀과 같은 형태의 균열이 다수 발생하였다.

이러한 균열은 용매가 건조될 때 발생하는데, 일반적으로 슬러리의 두께가 증가하면서 표면 상·하부의 건조가 불균일할 경우, 또 빠른 건조로 인하여 전극이 수축하는 경우가 있다. 증류수만 사용한 전극에서 관찰된 핀홀 형태의 균열은 전극의 두께로 인하여 상온 건조 과정에서 전극의 표면만 건조되고, 내부 증류수의 건조가 완전히 이루어지지 않아 진공 오븐 건조 시 전극 내부 잔류하고 있던 증류수가 급격하게 건조되며 발생한 것으로 판단된다 [10]. 전극의 균열을 효과적으로 억제하기 위하여 에탄올과 증류수를 혼합하였고 단계적 건조를 진행하여 건조속도를 제어하였다. 에탄올의 첨가는 증류수의 표면장력을 저하시킬 뿐만 아니라 건조 공정에서 공극 내 증류수의 모세관 현상에 의한 전극의 수축을 완화시킨다고 알려져 있다 [11]. 하지만, 에탄올의 첨가량이 점차 증가하면, 에탄올의 빠른 증발 속도로 인하여 전극이 건조 속도 및 수축 속도가 향상되어 균열이 증가하였다. 균열이 발생하지 않은 그림 2(d)의 전극 조성은 전극을 두껍게 도포하여도 건조 후 균열이 없이 제조되었다. 하지만, 그림 2(f)와 같이 두꺼운 두께의 전극은 약한 충격에도 집전체에서 전극이 쉽게 박리되었다.

활물질의 박리를 억제하기 위하여 집전체에 물리적 표면처리를 진행하였으며, 표면 처리 흑연 집전체는 펄트지와 같은 결이 노출되며 거친 표면이 형성되었다. 표면 처리된 집전체를 사용한 전극은 그림 2(g, h)와 같이 전극을 타발 및 파단 후에도 집전체와 전극이 분리되지 않았다. 같은 조성의 슬러리를 사용하여 두께별로 전극을 제조하였으며, 전극의 단면을 그림 3과 같이 SEM (scanning electrons microscopy, Philips)으로 분석하였다. 이를 통하여 전극 내 활물질의 균일한 분포를 확인하고, 실제 전극의 두께를 측정하였다. 또한 표면처리에 의해 흑연 집전체가 일부 박리되어 있는 것을 그림 3(g)와 같이 활물질과의 계면에서 확인할 수 있었다. 이러한 물리적 표면처리는 흑연 집전체의 박리를 발생시키며, 박리된 흑연 집전체의 표면에너지의 증가로 전극과의 접착성이 향상되었다 [12].

Table 1. Parameter of cathode slurry according to solvents ratio.

Samples	Solvent (wt%)		Solid loading (wt%)	Surface state
	D.I water	Ethanol		
a	40	60	74.5	Crack
b	56	44	72.5	Crack
c	77	23	71.7	Crack
d	84	16	68.7	-
e	100	0	67.3	Pinhole

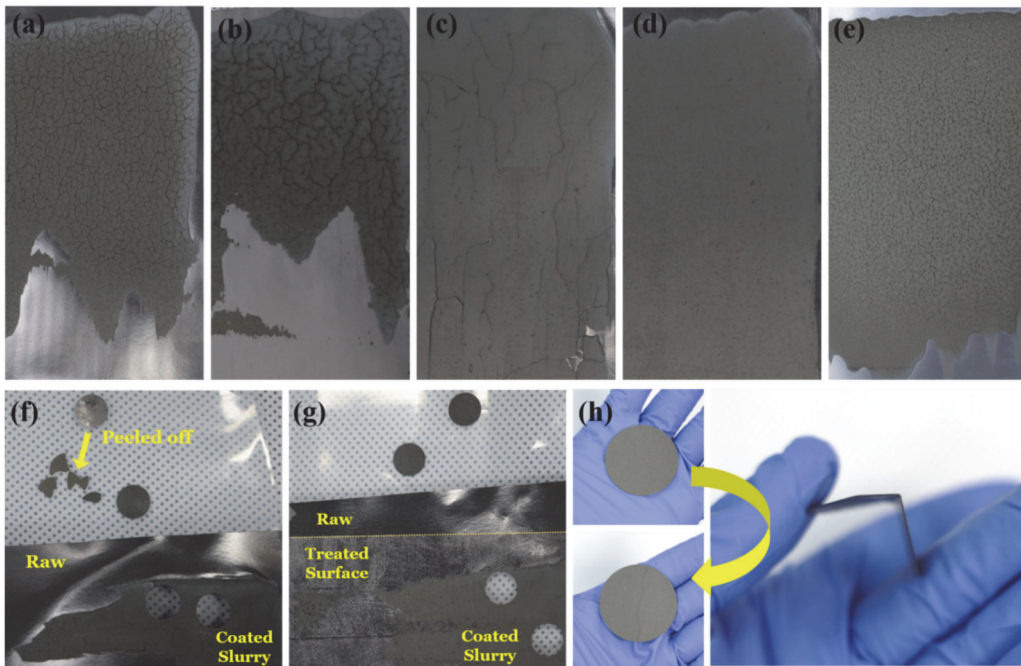


Fig. 2. Picture of (a-e) coated slurry according to Table 2, (f, g) coated slurry on raw and treated graphite sheet, and (h) structural characterization of fabricated film cathode.

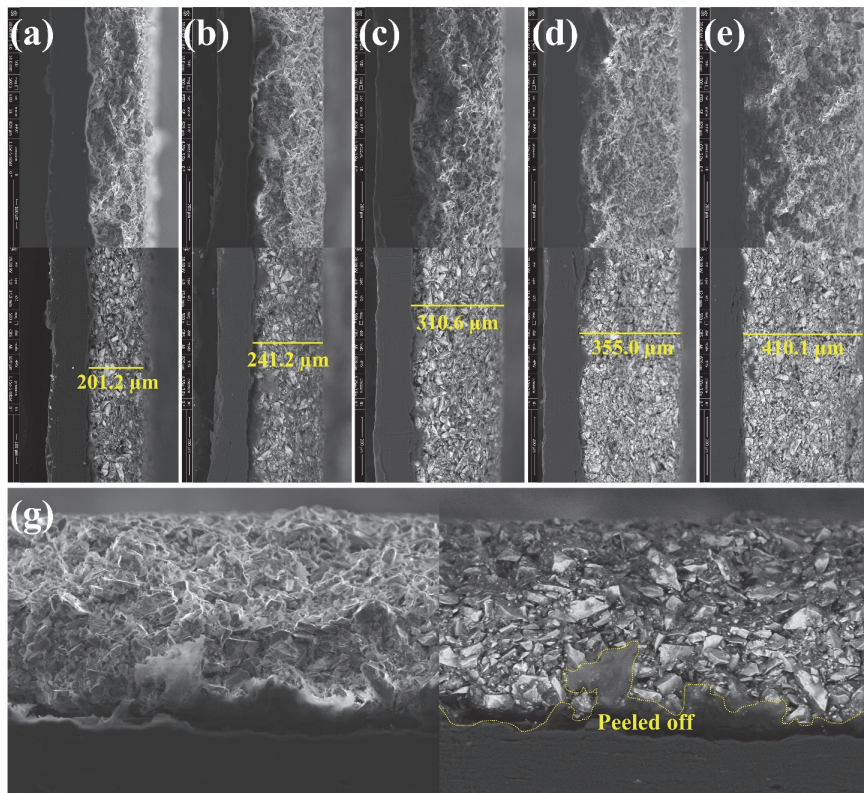


Fig. 3. Cross-sectional SEM images of film cathode at different coating thickness. (a) 450 μm, (b) 550 μm, (c) 650 μm, (d) 750 μm, (e) 850 μm, and (g) peeled off graphite sheet at 550 μm.

3.2 단전지 방전시험

테이프 캐스팅 방법의 특징인 전극 두께 조절 용이성의 효과를 분석하기 위하여, 두께에 따른 단전지의 특성을 평가하였다. 사용한 전극은 그림 3의 전극과 동일하며 전극의 제조 정보와 방전 결과를 표 2와 그림 4에 나타내었다. 전극의 두께는 SEM 이미지 상의 두께가 아닌, 마이크로미터(Micrometer, 547-401A, Mitutoyo)로 측정된 값을 기입하였다. 전극의 비용량은 일반적으로 FeS_2 양극 열전지에 사용되는 종료전압 1.5 V를 기준으로 사용하였다. FeS_2 양극의 경우 Z-Phase 로 알려져 있는 약 1.75 V에서 나타나는 Plateau 구간의 반응만을 사용하기 위해 1.5 V를 종료 전압으로 사용하는데, 이는 이후 반응 및 유지되는 전압 구간이 낮으며 저항이 크게 증가하기에 실질적으로 활용

하기 어렵기 때문이다 [2].

그림 4(a-f)와 같이 전극의 두께가 증가할수록 비용량이 감소함을 확인할 수 있다. 비용량은 이용률과 동일한 의미로 해석될 수 있으며, 활물질의 이용률은 활물질의 양과 두께에 반비례하는 것으로 알려져 있다. 전극의 두께 증가는 이온의 이동거리 및 분극 저항을 증가시킨다. 이는 활물질의 이용률이 감소하게 될 뿐만 아니라 무게당 용량인 비용량도 감소시키는 요인으로 작용하게 된다 [4-9]. 이러한 영향들로 그림 4(g)와 같이 두께에 따라 분극 저항이 점차 증가함을 확인하였으며, 이용률 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 추가적으로, 이용률 이외에도 두께에 따라 1.5 V 이하 방전 곡선의 형상이 다른 것을 알 수 있다. 그림 4(h)의 펠릿 전극과 비슷한 두께의 750 μm 전극과 동일 활물질 양을 갖는 850 μm 전극을 비교하였을 때, 방전 성능

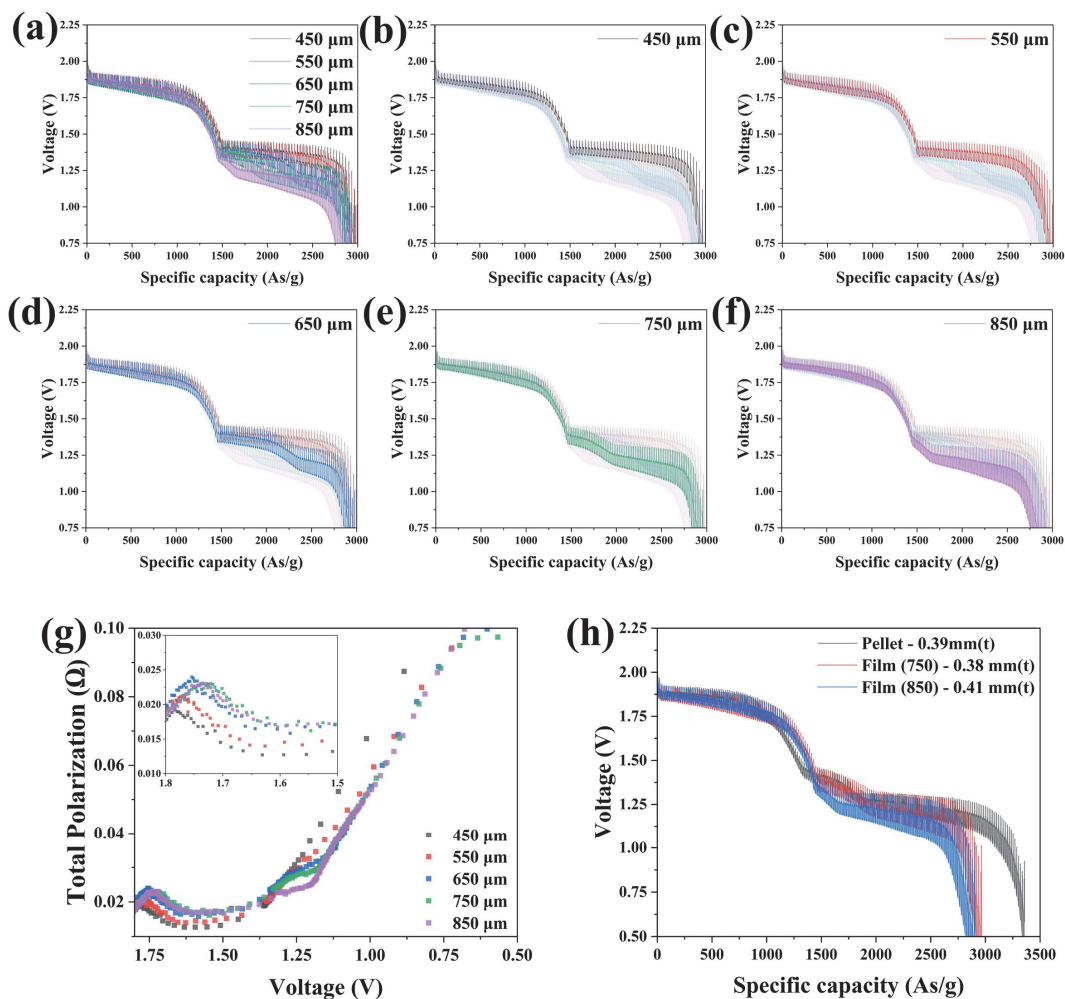


Fig. 4. Electrochemical properties of film cathode at different coating thickness. (a-f) Discharge curves, (g) total polarization of film cathode, and (h) comparison for the similar thickness film and pellet cathode.

Table 2. Parameter of film cathode according to coating thickness.

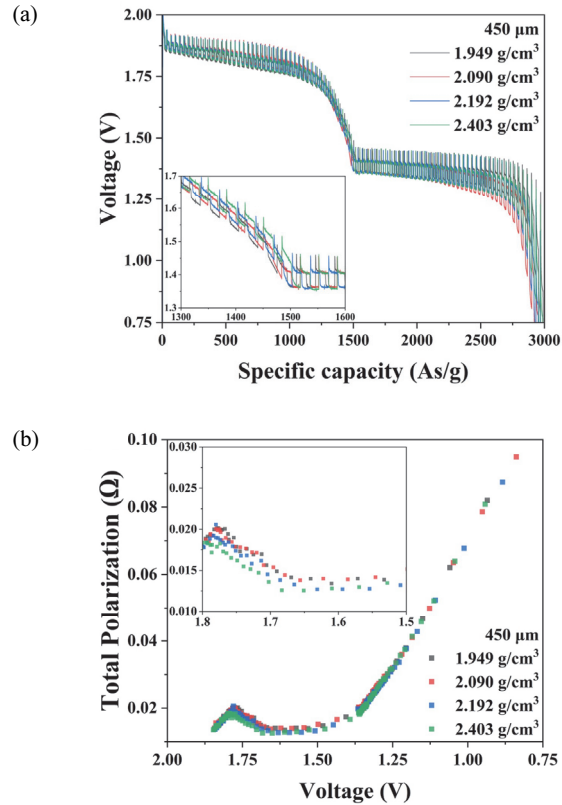
Coating thickness (μm)	Measured thickness (mm)	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Active material mass (g)	Specific capacity ($\text{As}\cdot\text{g}^{-1}$)
450	0.235	2.192	0.577	1462.1
550	0.275	2.167	0.667	1454.3
650	0.323	2.294	0.830	1405.3
750	0.381	2.295	0.979	1401.8
850	0.431	2.375	1.147	1377.1
Pellet	0.39	3.000	1.14	1289.4

이 유사함을 확인할 수 있으며, 이러한 원인이 활물질의 양보다 전극 두께에 기인한 것으로 판단된다. 전극 두께 편차에 따라 영향을 받을 수 있는 인자는 이온의 이동거리 이외에 전해질의 농도 구배가 있다. Patrick 등의 연구에 따르면 전해질로 LiCl-KCl 사용했을 때, 양극 내 K+의 농도가 전해질층으로부터 거리가 멀어질수록 증가하게 된다 [13]. 양극 내 K+의 농도가 높은 상태에서는 일반적인 FeS_2 의 반응과 다르게 J-phase ($\text{K}_{5.5}\text{Li}_{0.6}\text{Fe}_{24}\text{S}_{25.9}\text{C}_{1.0}$)의 중간 반응이 부분적으로 추가 형성되게 된다고 알려져 있다 [14]. J-phase는 X-phase (Li_2FeS_2)보다 더 높은 전압 구간에서 형성되는데, 기존 Z-Phase \rightarrow X-phase \rightarrow Li_2S 순서의 반응에서 Z-Phase \rightarrow J-phase \rightarrow X-phase \rightarrow Li_2S 로 반응이 추가적으로 진행된다. 또한 일부 X-phase가 J-phase로 변환되는 반응도 나타나게 된다. 이처럼 J-phase 반응을 유발하고 X-phase에서 Li_2S 로 전환될 때 낮은 전압대로 형성됨을 알 수 있다 [14,15]. 펠릿과 동일한 두께 또는 동일한 활물질량으로 제조된 전극들은 종료 전압을 기준으로 두 전극 모두 더 우수한 이용률을 나타내었다. 하지만, 0.5 V를 기준에서는 펠릿의 용량이 더 높았으며, 이는 펠릿의 초기 낮은 이용률에 따른 잔여 활물질의 반응과 제조 전극의 높은 자가방전 및 활물질의 열분해 등에 의한 것으로 판단된다 [16].

후막 전극의 제조방법으로 펠릿 전극보다 낮은 밀도에 따른 영향을 평가하기 위하여 이용률이 높고, J-phase의 영향이 없는 450 μm 전극을 압연하여 단전지 성능을 평가하였다. 표 3에 해당 전극들의 제조 정보를 표기하였으며, 밀도가 가장 낮은 전극은 제조 후 압연을 하지 않았다. 그림 5와 같이, 전극의 밀도가 증가할수록 두께는 감소하였으며 비용량이 증가하였다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 두께에 따른 결과만으로도 볼 수 있지만, 표 2의 550 μm 전극의 결과와 비교하면 밀도에 의한 영향이 나타

Table 3. Parameter of film cathode according to electrode density.

Coating thickness (μm)	Measured thickness (mm)	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Active material mass (g)	Specific capacity ($\text{As}\cdot\text{g}^{-1}$)
450 (Raw)	0.247	1.939	0.547	1449.5
	0.243	2.090	0.569	1455.9
450	0.235	2.196	0.577	1462.1
	0.210	2.403	0.569	1471.7

**Fig. 5.** Electrochemical properties of film cathode at different electrode density.

남을 확인할 수 있다. 압연을 하지 않은 전극의 경우, 550 μm 전극보다 낮은 두께에도 불구하고 낮은 이용률을 나타내었다. 일반적으로 테이프 캐스팅 방법으로 제조한 전극은 건조 직후, 용매 제거에 따른 전극 내 활물질 간 공극이 잔재하여 낮은 배열성 및 접촉성을 나타낸다. 따라서, 전극 간의 접촉 저항을 감소시키고, 전도성을 향상시키기 위하여 압연을 필수적으로 수행하여야 한다. 그림 5에서 처

럼 전극 밀도가 감소할수록 저항이 증가하였으며, 이에 따라 비용량 및 이용률이 감소하였다 [17]. 두 전극 보다 높은 밀도의 전극들은 두께 감소에 따른 확연한 이용률 증가를 보였다. 이러한 결과로 볼 때, 일정 수준의 밀도로 압연을 하는 것은 테이프 캐스팅 방법에선 필수적이지만, 그 수준 이상의 밀도에서는 두께에 의한 영향이 보다 지배적인 것으로 판단된다. 표 3보다 더 높은 밀도의 전극은 흑연 시트의 낮은 강성으로 압연에 의한 응력을 견디지 못하고 파손되어 본 연구에서는 제조할 수 없었다.

동일 활물질량으로 펠릿 전극으로는 제조할 수 없는 얇은 두께와 넓은 면적의 후막 전극을 제조하고, 펠릿 전극과의 비교를 통해 제조 방법에 따른 효과를 분석하였다. 그림

Table 4. Parameter of pellet and film cathode on same active material mass.

Sample	Measured thickness (mm)	Area (cm ²)	Density (g·cm ⁻³)	Active material mass (g)	Specific capacity (As·g ⁻¹)
Pellet	0.39	12.25	3.00	1.14	1289.4
Film	0.23	22.38	2.29	1.13	1347.4

6(a) 및 표 4와 같이 후막 전극을 펠릿 전극 대비 약 1.8배의 면적과 2/3 두께를 갖는 전극으로 제조하였다. 전극의 형상은 준비한 전극 타발기의 제한으로 내경이 있는 전극을 사용하였으며, 이는 조립형 열전지의 착화 방식에 따른 형상 차이로 단전지 시험을 통한 전극 성능에는 영향을 미치지 않는다. 후막 전극의 방전 시험은 면적에 비례하여 동일한 가압 조건 및 전류 밀도를 사용하였다. 그림 6(b)와 같이 대면적의 후막 전극은 동일 전류 밀도에서 넓은 면적에 따라 더 높은 전류로 방전하였음에도, 펠릿 전극보다 높은 활물질 이용률을 나타내었다. 일반적으로 전극의 면적만 늘어난다면, 동일한 면적당 저항으로 동일 전류 밀도에서는 같은 결과를 나타낸다. 하지만, 같은 양의 활물질을 사용하여, 더 넓은 면적과 얇은 전극을 제조하였기에 두께 감소에 따른 영향으로 이용률이 증가한 것으로 판단된다. 이러한 특성으로, 낮은 분극 저항을 갖는 후막 전극은 보다 높은 전류 밀도에서도 펠릿 전극 보다 높은 성능을 나타낼 것으로 기대된다.

기존 연구들과 본 연구에서 제조한 후막 양극들의 면적당 용량과 로딩 정도를 표 5와 그림 7에 비교하였다. 기존 연구들은 공통적으로 적은 로딩량에 따른 높은 활물질 이용률과 높은 비용량 및 출력 특성을 주로 표현하였다. 비용량은 활물질에 대한 특성 분석이나 작은 단전지 수준의 성능 평가에는 충분하지만, 적층과 조립이 필수적인 열전지에서는 비용량 보다는 부피나 면적당 용량을 고려해야 한다. 본 연구에서 제조한 후막 양극은 최대 35.79 mAh·cm⁻²로 기존 연구들의 약 20 mAh·cm⁻² 보다 높은 면적당 용량을 나타내며, 작은 면적의 펠릿 전극과 동일한 면적당 로딩량을 달성하였다. 이러한 후막 양극은 대면적 열전지를 제조 및 설계하는데 있어 펠릿 전극으로 제조가 불가능한 부분에서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

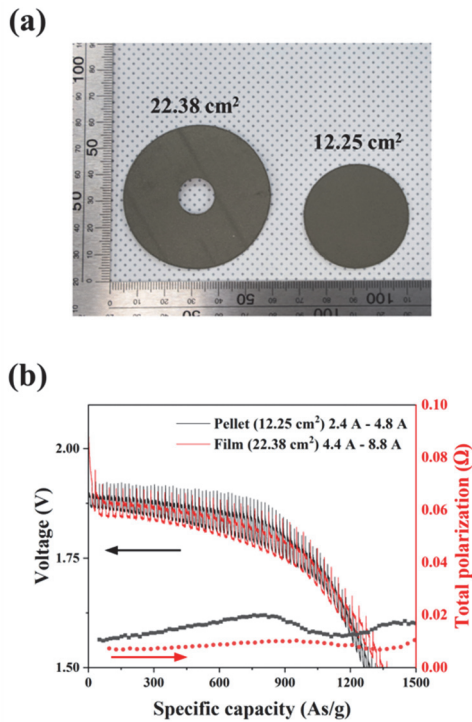


Fig. 6. Comparison of pellet and film cathode on same active material mass. (a) Picture and (b) electrochemical properties.

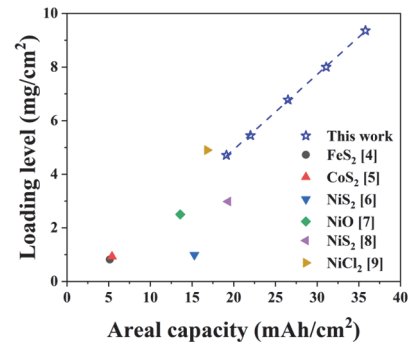


Fig. 7. Loading level and areal capacity diagram of fabricated film cathode and different types film cathode.

Table 5. Specification of film cathode using by tape casting on different papers.

Classification (ref. no.)	1 [4]	2 [5]	3 [6]	4 [7]	5 [8]	6 [9]	This work
Active material	FeS ₂	CoS ₂	NiS ₂	NiO	NiS ₂	NiCl ₂	FeS ₂
Binder	None	PVDF	PVDF, PVP	PVDF	PVDF	PVDF, Na ₂ SiO ₃	MgO, SiO ₂
Electrolyte	LiCl-KCl	LiCl-KCl	LiF-LiCl-LiBr	LiCl-LiF-LiBr	LiCl-LiF-LiBr	LiCl-LiF-LiBr	LiCl-KCl
Cathode thickness (μm)	50	50	300 (Under)	80	120	180	410
Heat treatment temperature (°C)	None	None	700	450	350	600	None
Areal capacity (mAh/cm ²)	5.13	5.40	15.29	13.59	19.34	16.81	35.79

4. 결론

본 연구는 테이프 캐스팅 방법을 이용하여 후막 양극을 제조하고, 두께와 밀도에 따른 전기화학적 특성을 분석하였다. 후막 양극 제조를 위하여 고분자 바인더를 사용하지 않는 방법으로 집전체의 표면 처리 및 슬러리 용매 혼용을 통하여 35.79 mAh · cm⁻²의 높은 로딩량을 갖는 후막 양극을 제조하였다. 후막 전극의 얇은 두께는 활물질의 이용률을 향상시키고 활물질에 반응을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 후막 전극의 제조방법에서 압연이 필수적으로 실시되어야 하며, 전극의 두께에 따른 방전성능 영향이 지배적임을 확인하였다. 본 연구에서 제조한 후막 양극은 펄릿 전극으로 제조가 불가능한 두께 이하 영역에서 더 넓은 면적으로 사용 가능하여, 얇고 넓은 면적의 이점을 활용할 수 있음을 확인하였다. 기존 테이프 캐스팅 방법 연구들의 실제 활용하기 어려운 로딩량의 후막을 제조한 것에 반하여, 본 연구에서 제조한 후막 양극은 실용성을 갖는 로딩량의 전극을 구현하였기에, 이를 활용하면 열전지 설계에 있어 보다 다양한 시도가 가능할 것으로 기대된다. 후막 양극의 활용성을 증진시키기 위하여 추후에는 전해질 및 음극의 대면적 후막화에 대한 연구를 추가 진행할 예정이다.

ORCID

Wonjun Ahn

<https://orcid.org/0000-0002-8559-1510>

감사의 글

This work was supported by Korean Government (Defense Acquisition Program Administration (DAPA)) in 912986201.

REFERENCES

- [1] R. A. Guidotti and P. J. Masset, *J. Power Sources*, **161**, 1443 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.013>
- [2] P. J. Masset and R. A. Guidotti, *J. Power Sources*, **177**, 595 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.017>
- [3] T. R. Park, H. Park, K. Kim, C. N. Im, and J. H. Cho, *Energy Convers. Manag.*, **236**, 114033 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114033>
- [4] J. Ko, I. Y. Kim, H. Cheong, and Y. S. Yoon, *J. Am. Ceram. Soc.*, **100**, 4435 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1111/jace.14991>
- [5] J. Hu, Y. Chu, Q. Tian, J. Wang, Y. Li, Q. Wu, L. Zhao, and Y. Zhu, *Mater. Lett.*, **215**, 296 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.114>
- [6] C. Jin, K. Song, J. Liu, B. Ge, L. Zhao, X. Pu, and W. Li, *J. Alloys Compd.*, **833**, 155091 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155091>
- [7] Z. Liao, L. Fu, J. Zhu, W. Yang, D. Li, and L. Zhou, *Mater. Lett.*, **280**, 128592 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128592>
- [8] B. Yao, L. Fu, Z. Liao, J. Zhu, W. Yang, D. Li, and L. Zhou, *J. Alloys Compd.*, **900**, 163448 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163448>
- [9] B. Yao, L. Fu, J. Zhu, W. Yang, and L. Zhou, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **17**, 10662 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.4c19755>
- [10] P. Li, Z. Mao, X. Huang, and M. Deng, *Materials*, **16**, 2439 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma16062439>
- [11] W. Zhang, H. Lin, M. Xue, S. Wang, J. Ran, F. Su, and J. Zhu, *Constr. Build. Mater.*, **325**, 126579 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126579>
- [12] N. Billot, T. Günther, D. Schreiner, R. Stahl, J. Kranner, M.

- Beyer, and G. Reinhart, *Energy Technol.*, **8**, 1801136 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201801136>
- [13] L. Redey, J. A. Smage, J. E. Battles, and R. Guidotti, *Argonne National Laboratory Report ANL-87-6* (1987).
- [14] Z. Tomczuk, S. K. Preto, and M. F. Roche, *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 760 (1981).
doi: <https://doi.org/10.1149/1.2127502>
- [15] Z. Tomczuk, B. Tani, N. C. Otto, M. F. Roche, and D. R. Vissers, *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 925 (1982).
doi: <https://doi.org/10.1149/1.2124067>
- [16] Y. Choi, H. R. Yu, H. Cheong, S. Cho, and Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 161 (2014).
doi: <https://doi.org/10.14478/ace.2013.1123>
- [17] M. Abdollahifar, H. Cavers, S. Scheffler, A. Diener, M. Lippke, and A. Kwade, *Adv. Energy Mater.*, **13**, 2300973 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202300973>