

## 4D Lookup Table Interpolating을 이용한 단위 전지 방전 시험 기반 열전지 성능 예측

박병준, 김지연, 하상현, 조장현<sup>a</sup>

국방과학연구소 4기술연구본부 4부

### Performance Estimation Based on 4D Lookup Table Interpolating and Unit Cell Discharge Tests for Thermal Battery

Byeong June Park, Ji Youn Kim, Sang Hyeon Ha, and Jang Hyeon Cho<sup>a</sup>

The 4<sup>th</sup> R&D Institute, Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

(Received January 4, 2017; Revised April 3, 2017; Accepted April 10, 2017)

**Abstract:** For comparison to the Li-ion battery, evaluating a thermal battery must consider additional variables. The first one is the temperature difference between the battery and its unit cell. Thermal batteries and their unit cells have a temperature difference that is caused by the thermal battery activation mechanism and its shape. The second variable is the electrochemical reaction steps. Most Li-ion batteries have a constant electrochemical reaction at the electrode, and battery voltage is affected when the concentration of Li ions is changed. However, a thermal battery has several steps in its electrochemical reaction, and each step has a different potential. In this study, we used unit cell discharge tests based on interpolating a 4D lookup table to estimate the performance of a thermal battery. From the test results, we derived an estimation algorithm by interpolating the table, which is queried from specified profile groups. As a result, we found less than a 5 percent difference between estimation and experiment at the 1.3 V cut-off time.

**Keywords:** Lookup table, Battery, Performance, Estimation, Model, Thermal battery, Unit cell, Interpolating

### 1. 서론

열전지는 유도무기체계에 주로 사용되는 1차 전지 및 비축전지로서 장기 저장성과 고출력 특성을 가지는 전지이다. 이러한 특성은 전해질의 고유 특성에 의한 것으로 비축 시 상온 상태에서는 전해질이 고체 상태로 있게 되어 매우 낮은 이온전도도를 가지게 된다. 때문에 자가 방전이 거의 없으므로 긴 시간동안에도

활물질을 유지할 수 있게 되어 장기 저장 특성을 가지게 된다. 하지만 착화기에 의한 열전지 활성화 시 열전지는 적층 전극마다 위치한 열원에 의해 내부 온도가 전해질의 용융 온도보다 상승하게 된다. 이로 인해 약 500°C 정도의 액체 전해질이 형성되고, 그 결과 매우 높은 이온전도도와 뛰어난 출력 특성을 가지게 된다[1,2]. 전해질의 이온전도도는 온도가 상승할수록 증가하므로 열전지의 성능은 열전지 내부의 온도에 많은 영향을 받게 된다. 일반적으로 열전지에 사용되는 음극은 Li-Si 합금, 전해질은 LiCl-LiBr-LiF 용융염, 양극은 FeS<sub>2</sub>로 주로 사용하고 있는데, 전해질의 용융 온도는 약 430°C이며, 양극 FeS<sub>2</sub>의 분해온도는 입자 사이즈 등의 조건에 따라 다르나 약 550°C 정도이다 [3].

a. Corresponding author; [jhcho@add.re.kr](mailto:jhcho@add.re.kr)

Copyright ©2017 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.

때문에, 열전지가 최적의 성능을 내기 위해서는 용융 온도인 430°C와 분해온도인 550°C 사이인 500°C 부근을 유지하는 것이 중요하다.

하지만, 실제 열전지에서는 열전지 형상과 배치 및 대류에 의한 냉각 등에 의해 모든 열전지 내부의 단위 셀이 균일한 온도를 가지지 못하고 위치와 시간에 따라 다른 온도분포를 가지게 된다 [4]. 그러므로 균일한 온도 유지조건에서 진행되는 열전지 단위 전지 실험 결과를 토대로 예측된 성능과 실제 열전지에서의 얻을 수 있는 방전 성능은 많은 차이가 있게 된다. 뿐만 아니라, 일반적으로 열전지에 사용되는 전극 물질의 전기 화학 반응은 몇 단계의 경로를 거치게 되고 각 반응 단계마다 전위도 다르게 나타난다 [5]. 때문에, 방전 특성이 몇몇의 전압 평탄부가 함께 존재하게 되므로 일반적인 리튬이온 전지의 성능 예측에 비해 더욱 어려움이 많다.

현재 국내에서 열전지 성능 예측 관련 논문은 Simulink를 이용한 예측 모델 연구뿐이며, 국외 논문의 경우, 관련 논문은 온도프로파일이 반영될 수 없는 Lumped model을 이용한 성능 예측만 보고되었다 [6,14].

따라서 본 연구에서는 Matlab을 이용하여 구현된 lookup table 방식 및 Interpolation을 적용하여, 열전지 단위 전지 방전실험 결과와 1차원 열전달 M&S (modeling and simulation) 통해 얻어진 열전지 내부 온도 프로파일을 반영한 열전지의 성능 예측 모델에 대한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 단위 전지 실험

먼저, 열전지 의 모든 부분의 온도 범위에 대한 성능이 필요하므로 다양한 온도 조건 및 평균 전류 밀도 조건하에서 단위 전지 방전실험을 진행하였다. 사용한 단위 전지 구성은 그림 1과 같이 구성하였다. 단위 전지를 구성하는 각 전극 및 요소별 물성은 표 1과 같으며, Cold pressing 방식으로 펠렛을 만들어 사용하였다.

각 실험조건은 표 2와 같다.

위와 같은 단위 전지 방전 실험 각 조건하에서, 그림 2처럼 구성된 단위 전지 시험기에 해당 온도 조건

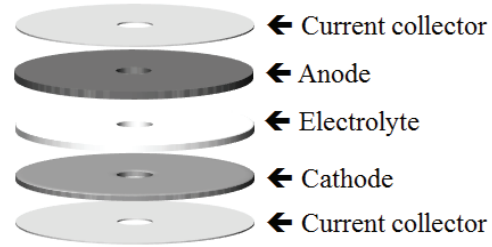


Fig. 1. Structure of thermal battery unit cell.

Table 1. Materials of unit cell.

Material	Mass (g)	O.D (mm)	I.D (mm)	Thickness (mm)
Cathode (FeS <sub>2</sub> )	1.81	44.67	8.32	0.38
Electrolyte (All-Li)	1.48	44.92	7.56	0.4
Anode (Li-Si alloy)	1.14	44.74	8.47	0.67

Table 2. Unit cell discharge test cases (51 cases).

Test conditions						
Temperature (°C)	430~590°C (10°C interval)					
Current (A) (Repeated profile)	Case 1		Case 2		Case 3	
	7.6 A	0 A	15.1 A	0 A	22.7 A	0 A
	2.4 s	0.1 s	2.4 s	0.1 s	2.4 s	0.1 s

을 설정하였다. 그리고 단위 전지를 열프레스 상·하판 사이에 삽입하고 250 kgf를 가압한 뒤, 2분 대기하였다. 그 후, DC-IR 방식으로 내부저항을 측정하기 위하여 전류 프로파일은 0 A, 0.1초, 각 전류 조건을 2.4 초 유지하는 사이클 방전을 반복하였다. 단위 전지 내부저항( $R_{tot}$ )의 계산 수식은 Fujiwara 등 [7]이 발표한 수식 (1)과 같다.

$$R_{tot} = \frac{V_{ocv} - V_{ccv}}{I_{ccv}} \quad (1)$$

$V_{ocv}$ 는 각 전류 프로파일에서 0 A 인가 후 0.03초 뒤의 전압,  $V_{ccv}$ 는 0 A 인가 후 0.01초 앞의 전압을 기준으로 하였다.  $I_{ccv}$ 는 인가된 전류값을 사용하여 내부저항을 계산하였다.

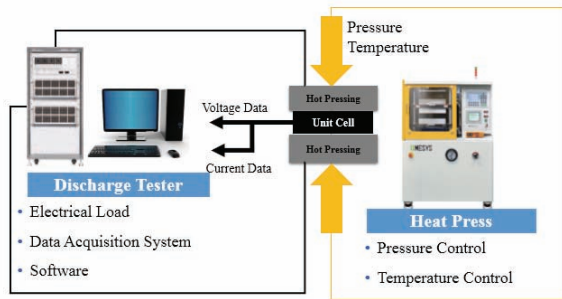


Fig. 2. Unit cell discharge test system.

## 2.2 열전지 실험

단위 전지를 이용하여 예측된 성능과 실제 성능을 비교하기 위해, 단위 전지를 적층하여 제조한 열전지에 대한 방전 시험을 진행하였다. 열전지 제조에 사용된 단위 전지의 각 전극 및 요소별 물성은 표 3과 같다.

Table 3. Materials of thermal battery components.

Material	Mass (g)	O.D (mm)	I.D (mm)	Thickness (mm)
Cathode (FeS <sub>2</sub> )	1.81	40.84	8.19	0.46
Electrolyte (All-Li)	1.3	40.97	6.9	0.42
Anode (Li-Si alloy)	1.14	40.93	8.23	0.78

표 3과 같은 단위 전지를 각 17셀 씩 적층 후, 위·아래에는 Mica로 단열하였으며, 옆면은 BF taping 및 BTU 자켓을 사용하여 측면 단열이 되도록 제작하였다. 이와 같이 제작된 열전지를 55°C에서 24시간 동안 보관 후, 10 A를 4초, 14 A를 1초인 방전 전류프로파일을 반복하여 부여하였다.

## 2.3 열전지 내부 온도 예측 모델

열전지의 성능을 예측하기 위해서는, 각 단위 전지 별로 시간에 따른 온도데이터가 필요하다. 때문에, 이를 구하기 위해 1D 열전지 내부 온도 예측 모델을 활용하였다. 내부 온도 예측 모델을 위해 사용한 단위 전지 요소별 물성 값은 표 4와 같다.

Table 4. Materials properties for thermal battery components.

Material	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/Kg-K)	K (W/m-K)	Cals (J/Kg)
Cathode	2783	992.3	1.02	-
Electrolyte	2210.47	870	1.02	-
Anode	1050.04	2072.5	5.44	-
Current collector	7937.08	690.8	21.65	-
Insulator (Mica)	2263.54	850	0.4	-
Insulator (BF)	205.78	979.7	0.08	-
Heat pellet	3299.28	745.3	21.86	1243.90

열전지 내부의 열전도 수식은 Fourier' law인 수식 2을 적용하였다.

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

에너지 보존법칙에 따라,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = Q \quad (3)$$

수식 3을 절점 별로 대수화하여 해석하였다. 모델의 양 끝단에는 Q값 대신 대류에 의한 냉각 식인 수식 4를 적용하여 해석을 진행하였다.

$$q = h(T - T_s) \quad (4)$$

모델의 각 요소는 열전지 적층 구성요소의 각 요소 별 두께마다로 분할하였으며, 지정 시간 간격마다 이전의 해석 값을 초기조건으로 하여 다음 시간 시의 결과 값을 계산하였다. 그리고 잔차에 대한 반영없이 바로 행렬 연산을 통해 절점별 온도 값을 구하는 direct solver를 사용하였다. 이를 이용하여 열전지 각 단위 전지별로 시간에 따른 온도 프로파일을 도출하였다.

## 2.4 열전지 성능 예측 모델

앞서 실험한 단위 전지 방전 시험 데이터와 열전지 내부 온도 예측 결과를 활용하여, 열전지의 성능을 예측하기 위한 모델을 수립하였다. 모델의 알고리즘은 크게 두 가지로 나누어진다. 먼저, 앞의 방전 시험 결과에서

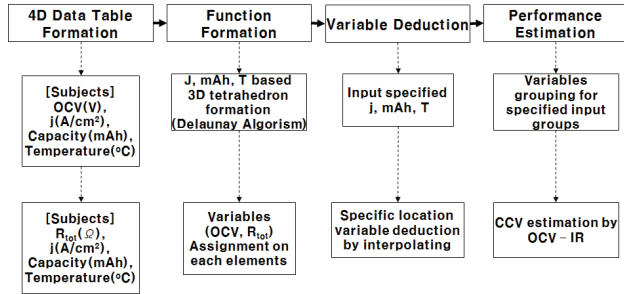


Fig. 3. Performance estimation flow chart.

OCV, 온도, 평균 전류 밀도, 방전 용량 그리고 내부 저항, 온도, 평균 전류 밀도, 방전 용량을 묶어서 두 가지 Scattered data table을 만들어주는 알고리즘이 있다. 그리고 이렇게 만들어진 4차원 Data table과 Delaunay algorithm 기반의 3차원 사면체 작성, 절점별 변수 값 지정 및 Interpolation을 적용하여 특정 지점 그룹의 OCV 및 내부저항 그룹을 도출하는 알고리즘으로 구성된다. 두 알고리즘을 통한 열전지 성능 예측 흐름도는 그림 3과 같다.

그림 3의 흐름도 및 각 알고리즘은 Matlab을 이용하여 구현되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단위 전지 방전 시험 결과

각 조건별 단위 전지 방전 시험 결과는 그림 4, 5, 6과 같다. 0.5A/cm<sup>2</sup>에서 각 온도별 단위 전지 방전 시험 결과, 450°C 미만 시 초기 내부저항 및 내부저항 상승률이 높다. 이는 전해질의 녹는점이 430~444°C로 보고된 것에 따르면 [8-11] 아직 완전히 상변화가 일어나기 전 또는 녹는점 근처이므로 점성이 높아서 이온전도도가 낮은 상태이기 때문으로 판단된다. 440~450°C 사이에서 1.3 V cut-off시 방전 용량 증가량이 크며 470°C 이상부터는 내부저항 차이가 적음을 알 수 있다. 0.5 A/cm<sup>2</sup>의 경우 500°C에서 가장 높은 방전 용량을 보이며 500°C 이상에서는 점점 방전 용량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 양극의 분해온도가 550°C 부근임을 감안할 때, 양극 분해에 의해 가용 활물질량 감소 및 분해 생성물이 리튬 이온 이동경로 상 저항으로

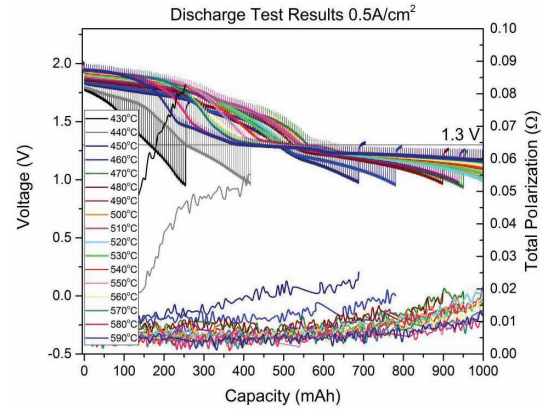


Fig. 4. Unit cell discharge results (0.5 A/cm<sup>2</sup>).

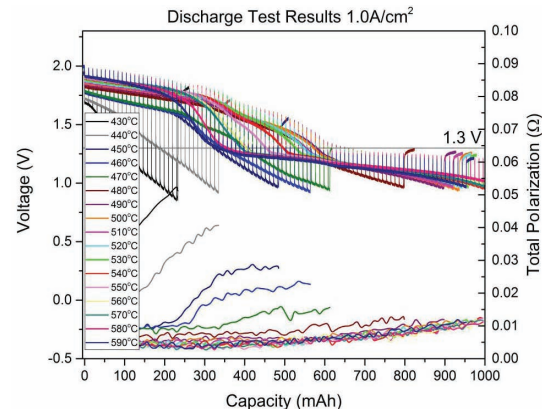


Fig. 5. Unit cell discharge results (1.0 A/cm<sup>2</sup>).

작용하여 생긴 결과로 분석된다 [12,13]. 550°C의 방전 용량과 450°C의 방전 용량이 비슷하며, 550~590°C 사이는 440~450°C 사이의 방전 용량을 보인다. 또한, 고온으로 갈수록 두 번째 전압 평탄부가 길어지며 내부저항이 감소함을 볼 수 있다. 이는 기존에 보고된 것과 같이 이온전도도가 온도의 함수로서, 온도가 증가할수록 증가함에 따른 것으로 분석된다 [5].

0.5 A/cm<sup>2</sup>의 경우, 전반적으로 total polarization 그래프가 노이즈가 많은 것으로 보인다. 이는, 계측 장비 자체의 노이즈가 반영된 것으로 상대적으로 다른 시험에 비해 낮은 전류 방전에 의해 노이즈의 영향이 큰 것으로 계산되어 표현된 것으로 판단된다.

그림 5는 1.0 A/cm<sup>2</sup> 조건하에서 다양한 온도 조건별 단위 전지 시험 결과이다. 470°C 이하에서 초기 내부저항 및 내부저항 증가율이 높으며, 480°C 이상부터는 내

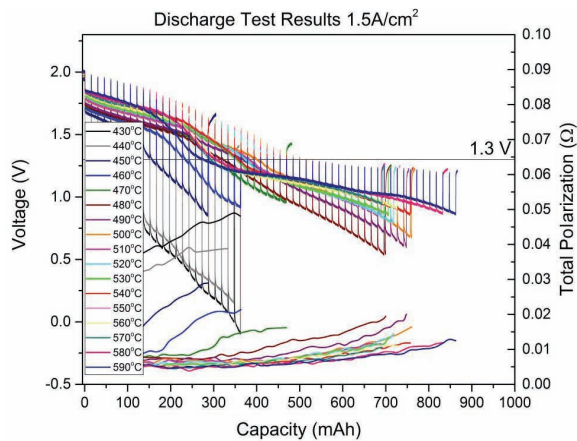


Fig. 6. Unit cell discharge results ( $1.5 \text{ A/cm}^2$ ).

부저항의 차이가 적다. 이는 앞서 서술된 것과 같이, 전해질의 녹는점이  $430\sim 444^\circ\text{C}$ 로 보고된 것에 따르면, 아직 완전히 상변화가 일어나기 전 또는 녹는점 근처이기 때문에 전해질 분자의 운동이 원활하지 않아서 이온 전도도가 낮은 상태이기 때문으로 판단된다.  $490\sim 500^\circ\text{C}$  사이에서 가장 높은 방전 용량을 보이며,  $470\sim 480^\circ\text{C}$  구간에서 방전 용량의 증가량이 가장 크다.  $500^\circ\text{C}$  이상부터 방전 용량이 감소하며, 이는 양극의 분해온도가  $550^\circ\text{C}$ 임을 감안할 때, 양극 분해에 의해 가용 활물질량 감소 및 분해 생성물이 이온 이동경로상 저항으로 작용하여 생긴 결과로 분석된다. 또한,  $560^\circ\text{C}$ 와  $470^\circ\text{C}$ 가 비슷한 방전 용량을 보이고 고온으로 갈수록 전압의 두 번째 평탄부가 길어지며, 내부저항이 감소함을 볼 수 있다. 이는 앞서와 같이 온도가 증가함에 따라 이온전도도가 증가하기 때문인 것으로 분석된다. Total polarization의 경우 그림 4에 비해 노이즈가 상대적으로 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 계측 장비 자체의 노이즈가 반영되었으나 상대적으로 이전 시험에 비해 높은 전류 방전에 의해 노이즈의 영향이 상대적으로 적은 것으로 계산되어 표현된 것으로 판단된다.

그림 6은  $1.5 \text{ A/cm}^2$  조건 하에서 다양한 온도 조건별 단위 전지 시험 결과이다. 이 경우도, 마찬가지로  $470^\circ\text{C}$  이하에서 초기 내부저항 및 내부저항 증가량이 높으며,  $480^\circ\text{C}$  이상부터는 내부저항 차이가 적다. 이는 앞서 서술된 것과 같이, 전해질의 녹는점이  $430\sim 444^\circ\text{C}$ 로 보고된 것에 따르면, 아직 완전히 상변화가 일어나기 전의 이온전도도가 낮은 상태이기 때문으로 판단된다.  $1.5 \text{ A/cm}^2$  조건 하에서는  $500^\circ\text{C}$ 에서 가장 높은

방전 용량을 보이며,  $440\sim 450^\circ\text{C}$  구간에서 방전 용량 증가량이 가장 크다.  $500^\circ\text{C}$  이후 점차 방전 용량이 감소하며, 앞서 조건과 마찬가지로 온도가 높아질수록 이온 전도도가 증가하므로 내부저항이 줄어든 것을 알 수 있다. 또한,  $550^\circ\text{C}$ 와  $470^\circ\text{C}$ 의 방전 용량이 비슷하며, 고온으로 갈수록 전압 두 번째 평탄부의 비중이 커진다. Total polarization의 경우 그림 5에 비해 노이즈가 매우 적어진 것을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 이전 실험에 비해 높은 전류로 방전 시험을 진행하였기에 노이즈의 영향이 적은 것으로 계산되어 표현된 것으로 판단된다.

### 3.2 열전지 내부 온도 예측 결과

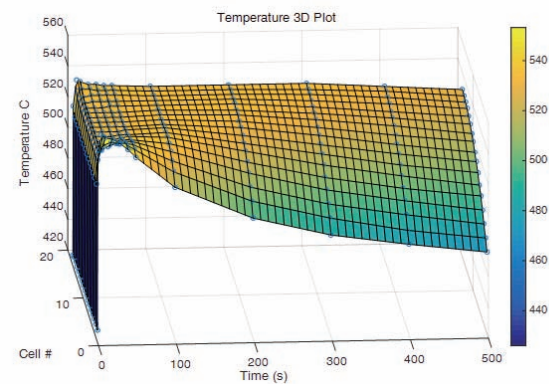


Fig. 7. Thermal battery temperature estimation result.

그림 7은 1D 열전지 내부 온도 예측 결과로, 셀번호 및 시간에 따른 온도 그래프이다. 17 cell이 적층된 열전지의 1번부터 17번 셀까지의 온도 분포 그래프이다. 1번 셀이 열전지 상부와 가장 가깝고, 17번 셀이 열전지 중간 부분인 병렬연결부분에 가장 가깝기 때문에, 시간이 지남에 따라 병렬 연결부분의 17번 셀은 내부 온도가 천천히 하강되나, 1번 셀은 대류에 의해 온도가 보다 빠르게 하강함을 볼 수 있다. 1번 셀의 경우, 다른 셀에 비해 초기온도가 높음을 볼 수 있는데 이는 1번 셀 아래에 단열재와 추가 열원이 열전지 존재하므로 초기 연소 시 온도가 상승하는 것으로 판단된다 [5].

### 3.3 열전지 성능 예측 모델 결과

그림 8, 9, 10은 열전지 성능 예측 모델의 결과로,

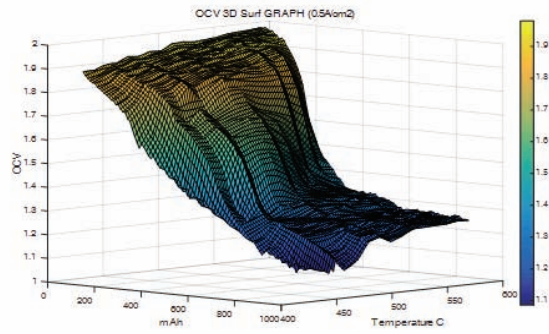


Fig. 8. OCV Estimation graph for 0.5 A/cm<sup>2</sup>.

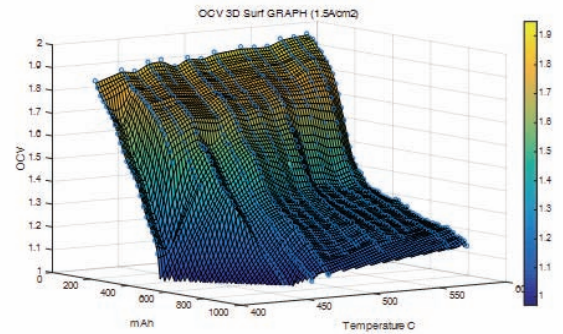


Fig. 10. OCV Estimation graph for 1.5 A/cm<sup>2</sup>.

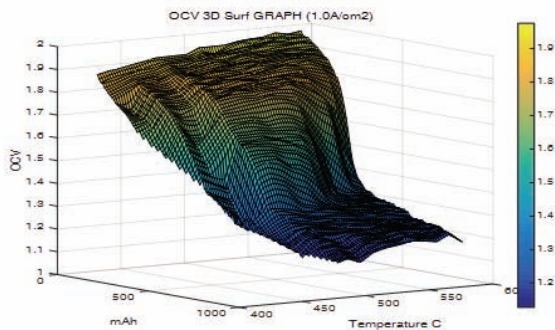


Fig. 9. OCV Estimation graph for 1.0 A/cm<sup>2</sup>.

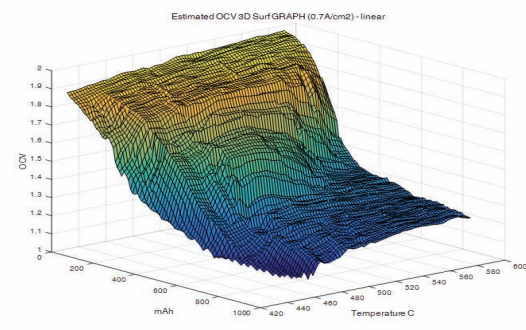


Fig. 11. OCV Estimation graph for 0.7 A/cm<sup>2</sup>.

그림 10과 같이 단위 전지 방전 시험 데이터(점)를 기반으로 그 외 부분에 대해 interpolating된 결과 그래프를 나타낸다. 그 결과, 전류 밀도에 대해서는 0.5, 1.0, 1.5 A/cm<sup>2</sup> 케이스만 진행하였기에, 데이터 사이 사이는 보간법으로 예측된 면으로 표현되었다.

앞서, 단위 전지 시험 결과에서 예상할 수 있듯이, 전류 밀도가 증가함에 따라 예측된 OCV는 방전 용량 대비 더욱 빠르게 하향되는 모습을 보인다. 이는 각 전류 밀도의 차이에 상관없이, 동일한 OCV 회복 시간을 인가해 주었기 때문에 보다 높은 전류 밀도에서 충분히 회복되지 못하고 다시 전류가 인가되므로 이와 같은 결과를 만든 것으로 판단된다.

뿐만 아니라, 3가지 결과 모두, 몇몇의 온도라인에 대해서 모서리면이 존재하는 것을 확인할 수 있는데 이는 10°C 간격으로 방전 시험을 진행하였기 때문에 시험데이터가 반영된 온도 라인만 모서리 형태로 보다 두드러지게 표현이 된 것으로 판단된다.

또한, 500°C 부근에서 가장 방전 용량이 우수하였기

때문에 가장 앞으로 튀어나온 형상을 볼 수 있다.

방전 전류 밀도가 높아질수록, 표면이 보다 매끄러워지는 것을 볼 수 있는데, 이러한 경향은 방전전류가 높아질수록 전류대비 노이즈의 상대적 영향이 줄어들기 때문으로 판단된다.

그림 11은 그림 8, 9, 10을 기반으로 예측된 0.7 A/cm<sup>2</sup>의 OCV 그래프이다. 실험으로 얻어진 예측 OCV, 방전 용량, 온도, 평균 전류 밀도의 분산 데이터 값이 전류 프로파일에 의해 연속적으로 분포하지 않기 때문에 예측 결과가 그림 8, 9, 10에 비해 매끄럽지 않음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, Delaunay algorithm 기반의 interpolating 분석 기법이므로, 뾰족한 영역이나 사면체 quality값이 안 좋은 부분들로 인해 매끄럽지 않은 부분이 나타난 것으로 판단된다.

### 3.4 열전지 성능 예측 결과

그림 12는 열전지 방전 시험 결과(experiment)와 고

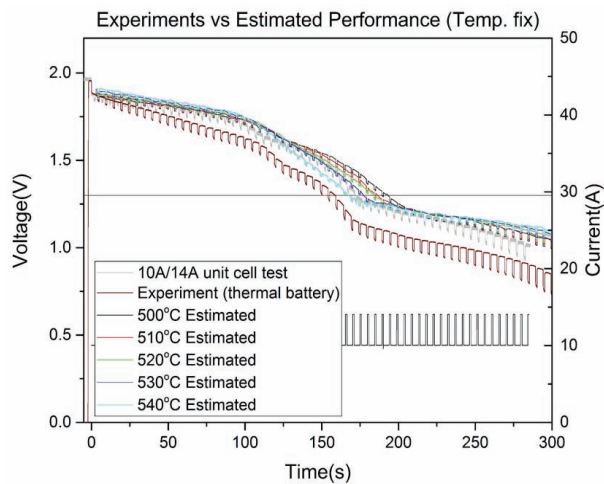


Fig. 12. Performance estimation (fixed temperature).

정 온도에서의 예측모델을 통한 성능 예측 결과(500~540°C) 및 동일 조건의 단위 전지 방전 시험 결과(10 A/14 A)를 표현한 그래프이다. 열전지의 경우 17셀 적층이므로 약 34 V가 맞으나 평균화된 비교를 위해 17셀 전압의 단위셀 평균값을 표시하였다. 열전지의 평균 전류 밀도는  $0.86 \text{ A/cm}^2$ 이며, 10 A, 14 A가 4초, 1초씩 반복하는 전류프로파일을 적용한 결과이다. 실제 열전지는 시간에 따라서 각 셀별 온도가 변화하나, 그림 12에서 500~540°C는 각 셀별 온도가 일정하다는 가정 하에 예측한 결과이다. 10 A, 14 A 프로파일이 존재하므로 전압이 위, 아래로 움직이는 것을 볼 수 있으며, 성능 예측은 동일한 전류 밀도 하에서 예측을 진행하였다. 그 결과, 동일 조건의 단위 전지 방전 시험 결과(10 A/14 A)와 완성전지의 방전 시험 결과(experiment)는 그래프에서 볼 수 있듯이 많은 편차가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한 고정 온도에 따라 예측된 결과 값도 편차가 존재하는 것을 알 수 있으며, 540°C를 기준으로 예측한 결과가 가장 실제 열전지 방전성과 근접하였다. 이는 열전지를 상온에서 시험 시 열전지 내부 온도가 약 500°C 부근에 도달하도록 설계하였기에 55°C에서 24시간 이상 보관 후 방전 시험을 진행한 결과 내부 온도가 설계 값에 비해 더 높게 상승한 결과로 판단된다. 또한 예측 결과에서 볼 수 있듯이 실제 열전지의 전극반응 단계 변화에 따른 전압 평탄부 변화가 예측 결과에도 나타남을 알 수 있다. 다만 첫 번째 전압 평탄부 부분과 1.3 V 이후 부분에서는 편차가 존재하는데, 이는 초기 온도의 차이 및 단위 전지의 형상과 열전지의 단위셀 형상의 차이, 온도

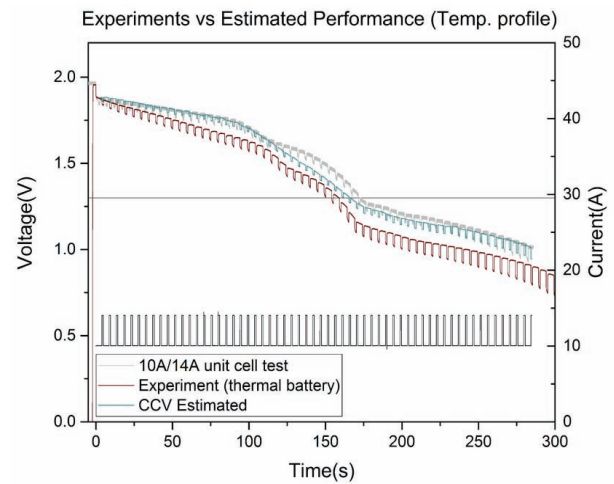


Fig. 13. Performance estimation (temperature profile applied).

프로파일의 차이, 전류 방전프로파일 차이에 의한 것으로 분석된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 완성전지와 예측 편차를 감소시키기 위하여, 그림 7의 초기온도가 55°C인 열전지 내부 온도 프로파일을 각 셀별로 적용하여 전압을 예측하였다.

그림 13은 열전지 내부 온도 프로파일을 적용한 예측 결과로서 실제 열전지와 마찬가지로, 각 셀별로 온도프로파일이 다름에 따라 예측 전압도 다르나, 17셀 전체의 평균 예측값을 표현하였다. 고정 온도 가정에 진행된 예측 결과나 완성전지와 동일 조건에서 방전 시험한 단위 전지 시험 결과에 비해 실제 성능 값에 더 근접한 결과를 보여준다. 하지만, 여전히 편차가 존재하는데 이는 그림 7에서 예측한 열전지 내부 온도 프로파일이 실제 열전지 내부 온도와 차이가 있는 점, 예측모델에 활용된 단위 전지 형상이 예측 대상 열전지 모델과 다른 점, 단위 전지 실험을 진행한 평균 전류 밀도 값과 예측 대상 열전지의 평균 전류 밀도 값이 가장 편차가 많이 발생할 지점인 점, 그리고 전류 프로파일 차이에 따른 저항 요소에 의한 에너지 소모의 차이 등에 기인한 것으로 분석된다.

본 연구에서 실시한 단위 전지 시험 결과와 lookup table interpolating 기법 및 1D 열전지 내부 온도 예측을 이용하여 적용한 성능 예측 결과는 기초 단계로, 단순화된 연구 결과이다. 하지만 이런 기본적인 시도를 통해, 향후 보다 정확한 열전지 내부 온도 예측 모델과 예측 모델에 대한 보정상수 연구 및 보다 많은 단위 전지 방전 시험 결과를 활용하여 열전지 성능 예측

분야에 대해서 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 단위 전지 방전 시험 결과와 열전지 내부 온도 예측 결과 그리고 4D lookup table interpolating 기법을 이용한 열전지 성능 예측을 알아보려고 하였다. 연구 결과, 이를 이용한 열전지 성능 예측의 가능성을 확인하였으며, 보다 다양한 형상의 단위 전지 시험 데이터 및 정확한 열전지 내부 온도 프로파일 데이터를 확보한다면 향후 다양한 열전지 모델에 대해서 단위 전지 시험 데이터만으로 성능 예측을 위한 기반 연구로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] R. A. Guidotti and P. Masset, *J. Power Sources*, **161**, 1443 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.013>]
- [2] H. W. Cheong, S. H. Kang, J. M. Kim, and S. B. Cho, *Journal of Ceramic Processing Research*, **13**, 198 (2012).
- [3] Y. S. Choi, H. R. Yu, H. W. Cheong, S. B. Cho, and Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 161 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.14478/ace.2013.1123>]
- [4] G.C.S. Freitas, F. C. Peixoto, and A. S. Vianna Jr., *J. Power Sources*, **179**, 424 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.084>]
- [5] R. A. Guidotti and P. Masset, *J. Power Sources*, **183**, 388 (2008) [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.04.090>]
- [6] H. J. Ji, *Journal of KIMST*, **11**, 102 (2008).
- [7] S. Fujiwara, M. Inaba, and A. Tasaka, *J. Power Sources*, **196**, 4012 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.009>]
- [8] A. G. Bergman and A. S. Arabadshan, *Russ. J. Inorg. Chem. (English Trans.)*, **8**, 369 (1963).
- [9] R. A. Guidotti and F. W. Reinhardt, *Proc. the 33<sup>rd</sup> International Power Sources Conference* (Electrochemical Society, New Jersey, 1988) p. 369.
- [10] P. Masset, *Ph.D. Thesis*, National Polytechnic Institute of Grenoble, Grenoble (2002).
- [11] J. R. Selman, D. K. DeNuccio, C. J. Sy, and R. K. Steunenberg, *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 1160 (1977). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2133519>]
- [12] Y. S. Choi, H. R. Yu, H. W. Cheong, S. B. Cho, and Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 72 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.14478/ace.2013.1109>]
- [13] S. Schoeffert, *J. Power Sources*, **142**, 361 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.038>]
- [14] S. Schoeffert, *Proc. 40<sup>th</sup> Power Sources Conference* (Electrochemical Society, New Jersey, 2002).