

알칼리 금속 열전기 변환기와 열전 발전기 하이브리드 시스템의 모델링 및 성능 분석

최현민* · 이제환** · 이욱현*** · 유지행*** · 주성재**** · 김형모*†

Modeling and Performance Analysis of an Alkali Metal Thermal to Electric Converter and Thermoelectric Generator Hybrid System

Hyeonmin Choi*, Jewhan Lee**, Wook-Hyun Lee***,
Ji Haeng Yu***, Sung-Jae Joo****, Hyungmo Kim*†

Key Words : Alkali metal(알칼리 금속), Thermal Energy storage(열에너지 저장 장치) Thermal to electric convertor(열전기 변환기), Thermoelectric Generator(열전 발전기), Modelica(모델리카)

ABSTRACT

This study presents the modeling and performance evaluation of a hybrid power generation system combining an Alkali Metal Thermal to Electric Converter (AMTEC) with a Thermoelectric Generator (TEG). The objective is to improve the utilization of high- and mid-temperature thermal energy by coupling AMTEC with TEG, thereby recovering residual heat from the AMTEC condenser for additional power production. A system-level simulation was developed using a Modelica-based platform (Dymola/OpenModelica), incorporating the interactions among the Thermal Energy Storage (TES), AMTEC, and TEG modules. The AMTEC model demonstrated accurate thermal and electrochemical behavior, showing less than 0.5 °C temperature deviation compared with experimental data and a power prediction error of approximately 6%. The TEG model reproduced experimental results with an error below 17%, depending on the imposed temperature gradient, with aluminum-based fins achieving the highest efficiency due to increased heat transfer area. Simulation results confirmed that the integrated TEG provides an additional 10% of the power output relative to the AMTEC cell generation alone, indicating a meaningful enhancement in overall system efficiency. The proposed hybrid configuration thus offers improved energy conversion performance while maintaining structural simplicity and reliability. This approach highlights the potential of AMTEC-TEG coupling as a next-generation power technology applicable to high-temperature energy storage, solar thermal systems, and advanced nuclear reactors. Future work will focus on extended experimental validation, material durability assessment of electrodes and electrolytes, and system-level optimization to further advance the commercialization of hybrid AMTEC.

1. 서 론

최근 세계적으로 온실가스 및 미세먼지 발생 저감을 위한 지속 가능한 친환경 에너지로의 전환이 국가별 에너지 믹스의 주요 과제로 떠오르고 있다. 기존 화석연료 기반의 발전

기술은 환경문제 등으로 인해 이용 확대에 한계가 예상되고 있어 지속적인 에너지 소비량 증가 대응 및 온실가스의 획기적 감소 등을 위하여 에너지 효율이 높고 신재생 에너지원 활용이 가능한 발전 및 동력 대안 기술개발이 요구된다. 하지만 재생에너지 확대에 따라 전력 공급의 불균형 현상으로

* 경상국립대학교 기계공학부(Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)

** 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

*** 한국에너지기술연구원(Korea Institute of Energy Research)

**** 한국전기연구원(Korea Electrotechnology Research Institute)

† 교신저자, E-mail : hyungmo@gnu.ac.kr

인해 전력의 급격한 수요와 공급 변동에 대한 유연한 대처가 어렵다⁽¹⁾. 따라서 재생에너지 비율 확대에 따른 문제점을 극복하기 위해 대규모 에너지 저장시스템과 이와 연계하여 수요대응형 발전 기술의 개발이 주목받고 있다⁽²⁾. 따라서 대용량 고온 에너지를 효과적으로 저장하여 긴 방전 지속시간 동안 안전하고 안정적인 전력 생산이 가능한 Thermal Energy Storage(TES)와 연계가 되어야한다.

그러나 전통적인 Power Cycle의 경우에는 높은 발전 효율과 운전 경험을 확보하고 있지만, 급한 전력생산이 필요한 경우와 소량의 수요대응 발전이 필요한 경우에는 적합하지 않을 수 있어, 보완이 될 수 있는 열-전기 직접 변환 옵션이 요구될 수 있다. Alkali Metal Thermal to Electric Converter (AMTEC)는 고온의 열 에너지를 직접적으로 전기 에너지로 변환하는 정적 에너지 변환기로, 우주, 고온 원자로, 그리고 방산 분야 등에서 발전이 필요한 분야에 사용될 수 있다⁽³⁾. AMTEC의 작동 유체는 소듐, 포타슘 등의 알칼리 금속이 사용되며, closed loop 구조를 가진다. 특히 AMTEC은 Beta Alumina Solid Electrolyte(BASE)를 통해 이온만을 선택적으로 통과시키는 구조적 특징을 통해 기계적 손실을 최소화하면서도 속응성 발전이 가능한 메커니즘을 가지고 있다⁽⁴⁾. 그러나 발전 이후의 응축부의 중온 알칼리 금속은 아직 발전을 할 수 있는 열 에너지를 보유하고 있어, 열에너지 이용률 측면에서 불리한 부분이 있다. 이러한 경우, 별도의 중온 열 에너지를 활용한 2차 발전을 연계함으로써 인체 모듈의 성능 향상을 기대할 수 있다.

TEG는 Seebeck 효과를 기반으로 고온과 저온 사이의 차이로부터 전기에너지를 생산하는 정적 발전 장치이다⁽⁵⁾. 고온 측과 저온 측의 열 흐름을 직접적으로 전기에너지로 변환하기 때문에, 기계적 손실이 없고 구조적으로 단순하여 소형화 및 모듈화 작업에 적합하다. 특히 TEG는 회전 부품이 없기 때문에 높은 신뢰성과 긴 수명을 가지며, 유지보수가 용이하다는 장점을 갖는다⁽⁶⁾.

본 연구에서 AMTEC의 응축부의 중온의 알칼리 금속의 열을 TEG의 열원으로 활용하여 기존 AMTEC 대비 추가적인 발전량 확보를 가능하게 하는 시스템을 제안하고자 하며, 동시에 해석 모델을 개발하고자 한다. 해석 모델은 열전소자의 물성치 및 형상에 따른 발전 성능 분석이 가능하며, 다양한 운전 조건에 대한 시뮬레이션을 통해 설계된 모듈의 성능 평가 또한 기대할 수 있다. 또한 본 모델은 Modelica 기반의 시스템 해석 모델로 과도해석을 포함한 빠른 계산이 가능하다. 이에 본 연구에서는 TES에서 예상되는 경계조건을 활용하여, AMTEC, TEG 간의 열전달 연계 및 에너지 흐름을 종합적으로 고려한 해석 모델을 개발하고자 하였다.

2. AMTEC 및 해석 방법

2.1 AMTEC 설계

Fig. 1은 AMTEC의 구조를 보여주는 그림이다. AMTEC은 내부의 유체를 증발시킬 수 있는 고온의 증발부, 고온의 증발된 유체가 이온화되기 위한 표면을 제공하는 전극, 유체의 이온만 선택적으로 전달할 수 있도록 만드는 고체 전해질인 Beta Alumina Solid Electrolyte(BASE), 그리고 증발된 유체를 액체로 응축시키기 위한 응축부로 구성되어 있다.

AMTEC의 발전 사이클은 다음과 같다. 증발부에서 작동 유체가 증발되고 electrode와 만나게 되면 이온이 분리되게 된다. 분리된 이온은 base를 통과하게 되며, 이때 base는 이온만 통과할 수 있도록 만들어졌다. 통과되는 과정에서 작동 유체의 이온은 발전을 하게 되며, 발전을 마친 이온은 BASE를 통과하여 다시 원소와 합쳐지게 된다. 그리고 해당 증기는 응축부로 이동하여 액체로 응축하고, pump 또는 wick을 통해 다시 증발부로 이동하게 된다. 해당 과정을 지속적으로 거치면서 발전하게 되는 원리를 가진다. 해당 AMTEC 설계는 기존의 AMTEC과 달리 아래에 TEG가 추가로 부착되어 응축되어 나온 액체 소듐을 한번 더 이용하여 추가 발전을 시킬 수 있도록 설계되었다.

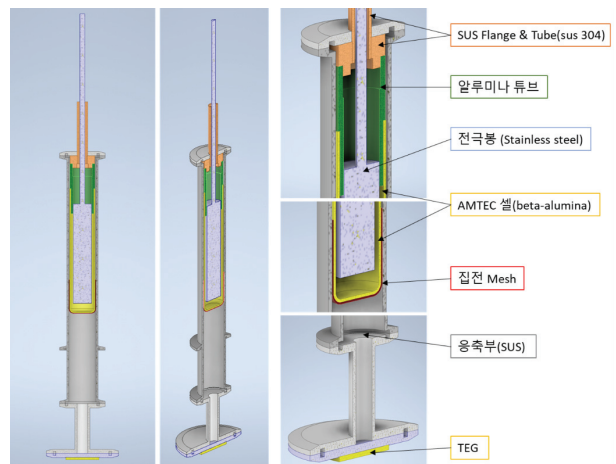


Fig. 1 Design of AMTEC

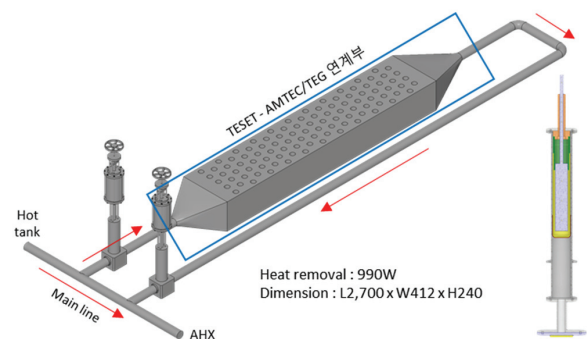


Fig. 2 Example of the Interface between AMTEC and TES

Fig. 2는 AMTEC과 TES의 연계 방안 중 하나로 보여주는 그림으로, AMTEC 모듈이 장착되는 개념의 예시를 보여준다. Fig. 3는 AMTEC과 추가 발전을 위한 TEG의 연계를 보여주는 사진으로, AMTEC 아래에 설치되어 AMTEC에서 발전을 마친 증온의 소듐을 이용하여 추가 발전을 하고자 한다.

2.2 Modelica 기반 해석 모델

해당 해석 모델은 Modelica기반의 1-D 해석프로그램인 Dymola를 사용하여 진행하였다. 해당 모델은 TES, AMTEC, 그리고 TEG로 구성하였으며, TES는 실제 ATMEC의 증발부 역할을 하도록 모델링 되었다.

Fig. 4(a)는 AMTEC의 열전달 구역을 3개로 나누는 것을 보여주는 그림으로 실제 실험에 사용된 AMTEC의 3D 모델을 보여준다. 이를 바탕으로 Fig. 4(b)와 같이 Modelica 기반의 해석 모델을 제작하였다. Fig. 4(b)의 TES의 경계 조건은 Table 1과 같다. TES 내부에 흐르는 고온의 열원은 0.4 kg/s의 질량 유속을 가지며, 내부 소듐 온도는 600 °C를 갖는다. AMTEC 내부의 소듐의 유량은 0.0002 kg/s이며, 해당 소듐의 inlet 온도는 상온인 30 °C로 설정하였다. 해석 모델은 Fig. 4(a)와 마찬가지로 열전달 구역을 3개로 나누는 것을 볼 수 있으며, Zone 1은 고온의 소듐이 처음 투입되는 구역이다. Zone 2는 내부에 cell이 존재하는 곳으로, 해당 구역에서 고온의 소듐의 cell을 통과하면서 발전을 한다. Zone 3는 발전을 마친 소듐이 cooling 되고, TEG와 연계되어 추가 발전을 하는 구역이다.

Fig. 5는 TES와 AMTEC의 증발부가 열교환이 발생하는

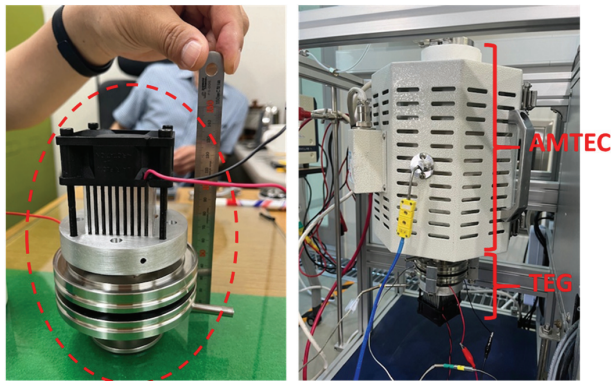


Fig. 3 AMTEC and TEG 연계

Table 1 Boundary condition of TES model

	Parameter	Value
Heat Source	Mass flow rate	0.4 kg/s
	Temperature	600 °C
AMTEC	Mass flow rate	0.0002 kg/s
	Temperature	30 °C

곳의 모델을 설명하는 그림이다. Port_a와 port_b는 각각 TES의 소듐의 입출구를 나타낸다. 그리고 파이프와 wall을 통해 열교환이 일어나며 wall은 실제 AMTEC의 증발부 재료

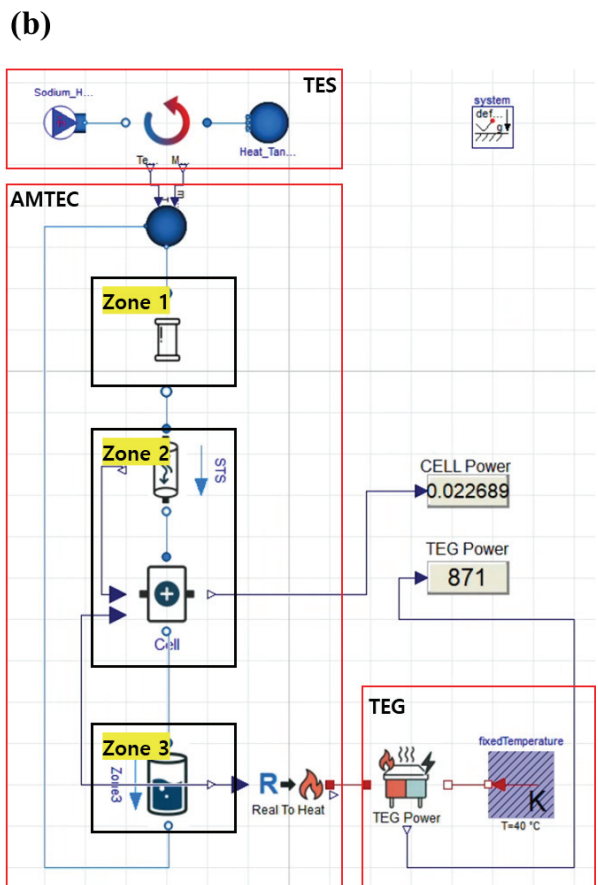
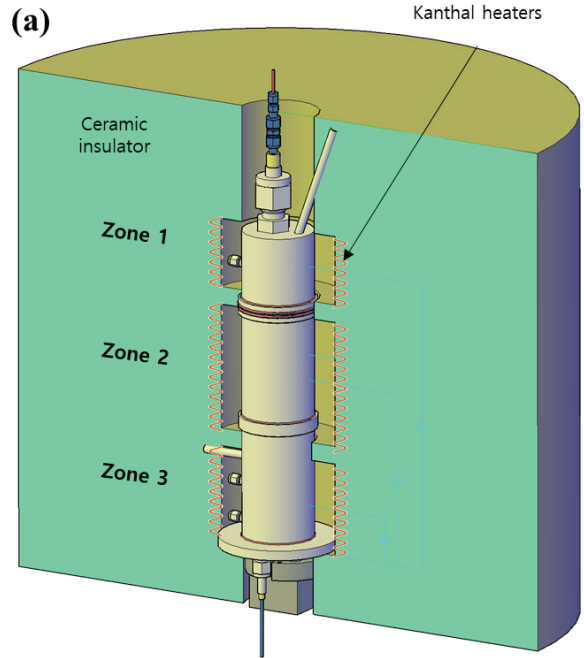


Fig. 4 (a): AMTEC with insulator, (b): AMTEC./TEG coupling simulation model

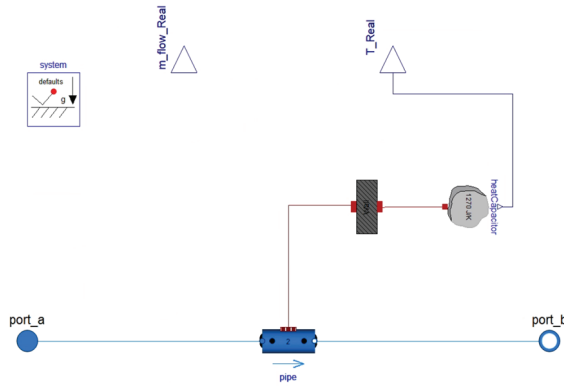


Fig. 5 TES and AMTEC heat transfer model

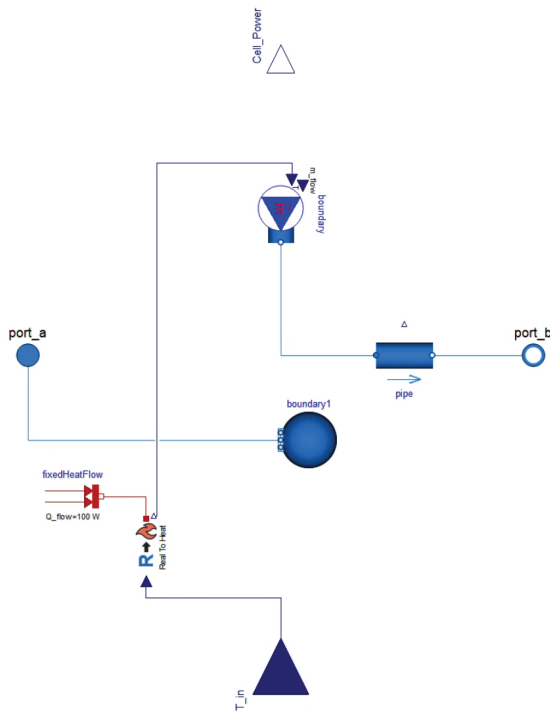


Fig. 6 Flow and heat transfer model of Cell

인STS 304를 기반으로 물성치가 입력되었다. 그리고 열교환이 된 후, AMTEC 내부의 소뚨은 m_flow_real과 T_real을 통해 유량과 온도가 결정되어 AMTEC 내부로 들어가도록 설정되어 있다. Fig. 6은 cell 내부 모델을 보여주는 그림이다. Fig. 6의 T_in을 통해 Zone 1의 온도를 받아들 수 있으며, 해당 온도가 Zone 2에 입력되도록 만들었다. 그리고 Zone 2에서는 열손실이 발생하는데, zone 1과 zone 2 사이의 열손실을 나타내기 위하여 heat flow 모델을 사용하였다. Fig. 6의 Cell_Power에서는 cell에서 발전한 power를 계산하여 나타내는 모델로, 다음과 같은 식 (1)이 사용되었다. 그리고 모든 발전은 온도, 압력, 저항 등에 의해 결정되도록 수식화 되었다. 이때 수식의 P는 압력, F는 패러데이 상수, R은 cell의 저항, T는 cell의 온도, I는 소뚨에 의해 발생하는 전류를 의미한다.

Table 2 Boundary condition of TEG

Base of TEG	Th - Tc (°C)
Al base 20mm pin 30mm	40
	55
	65
Al base 15mm pin 30mm	40
	55
	65
Al base 10mm pin 30mm	40
	55
	65
Al base 15mm pin 20mm	40
	55
	65
Cu base 15mm pin 30mm	40
	55
	65

Table 3 Experimental data of thermoelectric properties

T (K)	(μV/K)	(μV/K)	(10-3Ωcm)	(10-3Ωcm)
298	173	-209	0.927	2.38
323	185	-213	1.015	2.61
348	194	-210	1.198	2.79
373	200	-201	1.415	2.90
398	203	-187	1.632	2.94
423	204	-171	1.834	2.92

$$P = (0.5 \times \frac{RT \ln(\frac{P_{an}}{P_{cat}})}{\sum R_k}) \times (\frac{RT \ln(\frac{P_{an}}{P_{cat}})}{F} - I \times \sum R_k) \quad (1)$$

Fig. 6의 TEG 모델은 Cell에서 발전을 마치고 나온 증온의 소뚨을 한번 더 Cooling 해줌으로써 추가 발전을 하는 장치이다. 해당 TEG는 외기 온도와 자연 대류에 의해 cooling되는 형식으로, TEG Power는 증저온의 소뚨의 온도와 cooling 후의 저온의 소뚨의 온도차에 의해 결정되며, 아래의 수식을 통해 TEG 발전량을 알 수 있다. 그리고 TEG는 총 15가지의 case를 바탕으로 발전량을 분석하고자 하였다. TEG는 재료, 두께, 그리고 냉각 핀의 높이를 기준으로 case를 나누었으며, 온도차에 의해 추가적으로 조건을 나누었다.

$$P_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 (T_h - T_c)^2}{4(R_p + R_n + R_{met})} \quad (2)$$

$$(R_n = \frac{\rho_n l}{A_n}, R_p = \frac{\rho_p l}{A_p}, R_{met} = \frac{\rho_{met} l}{A_{met}}) \quad (3)$$

Table 2은 실험에서 사용한 조건을 나타낸 표이며, Table 3은 아래의 식 (2)에 사용되는 변수에 대한 표이다. 그리고 식 (2)에서 α_p 와 α_n 는 Seebeck 계수를 나타내며, T_h 와 T_c 는 각각 TEG의 고온과 저온부를 나타낸다. 그리고 R_p , R_n , R_{met} 은 각각의 저항을 뜻한다.

3. 결 과

Fig. 7은 TES와 AMTEC의 열교환 결과를 보여주는 그래프이다. AMTEC zone 1의 온도는 30 °C의 상온으로부터 600 °C까지 상승한 것을 알 수 있다. 이처럼 TES와 AMTEC

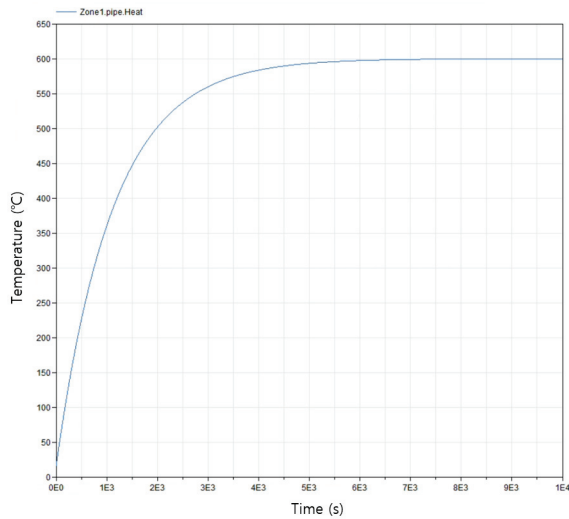


Fig. 7 Temperature graph of TES after heat transfer

Table 4 Outlet temperature value of TES

Q (kW)	TES		
	In (°C)	Out (°C)	dT (°C)
1	600	598.12	1.88

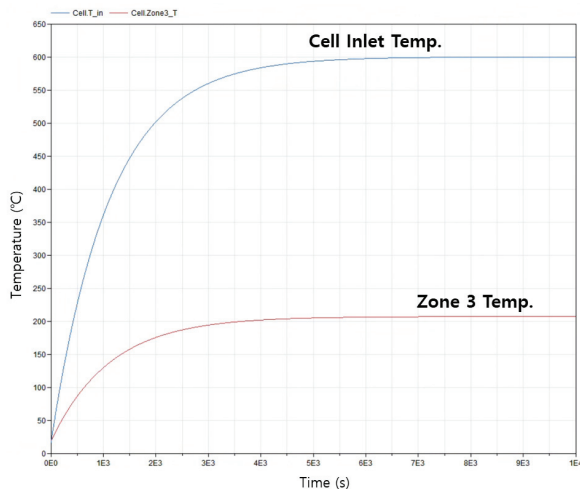


Fig. 8 Temperature graph of cell and zone 3

사이의 열전달에 문제가 없음을 알 수 있다. Table 4은 TES의 온도 변화를 보여준다. 약 1.2 °C의 온도가 하강한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 cell을 통과하는 소듐의 온도와 zone 3로 들어가는 소듐의 온도를 그래프로 나타낸 그림이다. Cell에 들어가는 소듐의 온도는 zone 1에서 열교환 된 소듐의 온도인 600 °C를 통해 발전을 하게 된다. 그리고 발전이 끝난 소듐이 Cooling part로 이동하여 약 200 °C까지 온도가 하강하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 zone 2의 cell에서의 발전량을 확인할 수 있는 그림으로, 1,117 W의 전기가 생산된 것을 확인할 수 있다. 그리고 냉각된 중온의 소듐은 TEG와 연계되어 한번 더 추가 발전을 하게 된다.

TEG는 고온과 저온 사이의 온도차를 이용하여 발전하는 시스템으로, 실험에서의 dT와 그에 따른 발전량은 Table 5에 나타냈으며, 본 해석 모델을 통해 생산된 발전량을 함께 나타내었다. 본 모델에서 프로그램 내의 fixed Temperature 기능을 이용하여 Th와 Tc 사이의 온도차를 설정하였다. Th - Tc의 온도차가 상대적으로 작을 때는 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. dT = 40 °C의 조건에서는 오차가 최대 5.38%로 나타나지만, dT = 65 °C의 조건에서는 오차가 최대 17%로까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 AMTEC 기기 하나 당 발전량은 cell 발전량의 약 10%로 나타난다. 이를 통해 추가 발전을 기대할 수 있다. 하지만 온도차가 작아 질수록 추가 발전 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있으며,

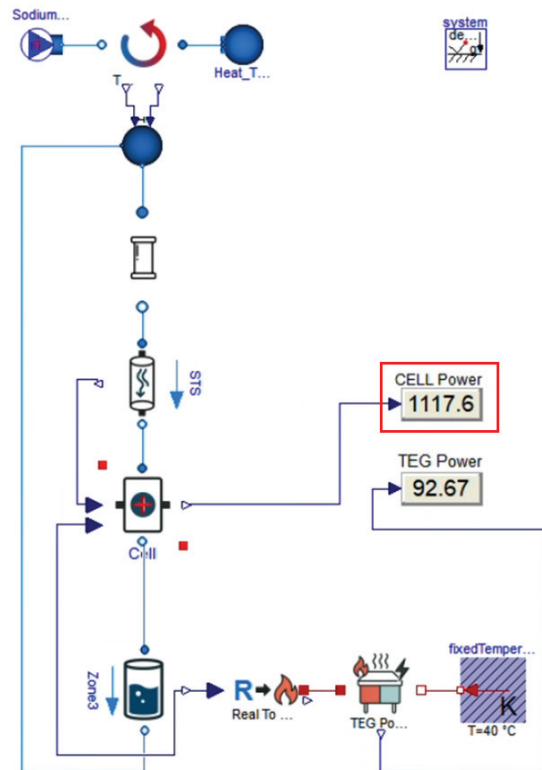


Fig. 9 Cell power value in Dymola model

Table 5 Results of experiment and Dymool analysis

Base of TEG	$T_h - T_c$ (°C)	Experiment Value (W)	Calculated Value (W)
Al base 20mm pin 30mm	40	0.60582	0.581
	55	1.082557	1.13
	65	1.476333	1.27
Al base 15mm pin 30mm	40	0.60384	0.572
	55	1.0035	1.09
	65	1.38208	1.21
Al base 10mm pin 30mm	40	0.6027	0.577
	55	0.96723	1.05
	65	1.36038	1.15
Al base 15mm pin 20mm	40	0.59605	0.564
	55	0.95697	1.02
	65	1.3376	1.11
Cu base 15mm pin 30mm	40	0.58548	0.558
	55	0.96184	1.03
	65	1.34322	1.15

적정 온도차를 유지해줘야만 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일 조건에서의 TEG는 Al base 20mm pin 30mm가 발전량이 가장 높은 것을 확인하였으며, 열전달 면적이 높기 때문에 이러한 수치를 나타내는 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 AMTEC 시스템의 열역학적 특성과 성능을 해석적으로 분석하였다. 해석 결과, 소듐의 거동을 통한 전력 변환을 확인할 수 있었다. 특히, 본 해석 모델은 온도별 물성 변화와 전기화학적 반응을 반영함으로써 실제 운전 조건을 보다 정밀하게 모사할 수 있음을 보였다.

또한, 출력 특성과 효율 분석을 통해 AMTEC 시스템이 고온 열원 기반의 차세대 발전 기술로서 충분한 가능성을 보유하고 있음을 확인하였다. 이는 태양열 발전, 소형 모듈형 원자로, 고온가스로 등 TES와의 연계가 기대될 수 있는 여러 고온 에너지 시스템에 적용할 수 있는 기반을 제공한다. 그리고 TEG를 추가적으로 장착함으로써 추가 전기 생산을 할 수 있음을 보였으며, 이는 AMTEC 단독 전기 생산량의 약 10 % 정도의 전기 생산을 차지하는 것을 알 수 있다. 이는 기존 단일 AMTEC 기반 발전 대비 성능이 개선된 것을 의미하며, 고온 열원을 활용하는 차세대 발전 기술로서 AMTEC 과 TEG 하이브리드 시스템의 경쟁력을 보였다.

향후 연구에서 대상 시스템의 설계 정보를 활용할 경우에는 실험 데이터와 비교를 통한 모델 검증, 전극/전해질 소재의 내구성 고려, 시스템 통합 수준의 최적화에 이용할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 후속 연구를 통해 본 연구는 AMTEC 기술의 상용화 가능성을 높이는 데 기여하는 동시에, 제안된 성능 평가 모델을 바탕으로 TEG의 최적화 설계를 통해 실험과 모델을 보완에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP20034-100)과 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원과 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-02307467, No. 20241K00000010).

References

- (1) Younis, A., Benders, R., Ramirez, J., de Wolf, M., & Faaij, A., 2022, "Scrutinizing the Intermittency of Renewable Energy in a Long-Term Planning Model via Combining Direct Integration and Soft-Linking Methods for Colombia's Power System", *Energies*, Vol. 15, 7604.
- (2) Xia, B., Xu, Y., and Zhou, D., 2024, "Sizing Energy Storage Systems to Dispatch Wind Power Plants: A DRO Model," *Energies*, Vol. 17, No. 6, pp. 2150-2163.
- (3) Wu, S.-Y., Xiao, L., and Cao, Y.-D., 2009, "A Review on Advances in Alkali Metal Thermal to Electric Converters (AMTECs)," *International Journal of Energy Research*, Vol. 10, pp. 868-892.
- (4) Lodhi, M. A. K. and Bankston, C. P., 2001, "Time-dependent BASE performance and power density in AMTEC," *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, No. 8, pp. 953-961.
- (5) Williams, N. P., 2024, "An Experimental Evaluation of Thermoelectric Generator Performance," *Heat and Mass Transfer Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 120-129.
- (6) Schwab, J. et al., 2023, "Experimental Analysis of the Long-Term Stability of Thermoelectric Generators," *Energies*, Vol. 16, No. 10, 4145.
- (7) Feiner, A. et al., 1994, "The Nernst Equation," *Journal of Chemical Education*, Vol 71, No. 6, 493.
- (8) Alexander, A. et al., 2023, "Design of Thermoelectric Generators and Maximum Electrical Power Using Reduced Variables and Machine Learning Approaches," *Energies*, Vol. 16, No. 21, 7263.