

재사용 배터리 ESS의 극한 환경요건에 따른 사전 영향 분석 연구

진태환*, 이인준*, 김경화*, 조경철*
*한국섬유기계융합연구원 에너지DX연구부
e-mail:jinth@kotmi.re.kr

A Preliminary Impact Analysis Study on Extreme Environmental Requirements for Reusable Battery ESS

Tae-Hwan Jin*, In-Jun Lee*, Kyung-Hwa Kim*, Kyung-Chul Cho*, Jin-Yong Kim**
*Dept. of Energy DX, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute

요약

컨테이너형 재사용 배터리 ESS의 열·습환경이 냉난방 부하 및 결로·정전기 위험에 미치는 영향을 1차 원리 기반 에너지·수분(수증기) 균형 모델로 해석하고, 국내 9개 도시와 국외 대표 지역을 대상으로 HDD·CDD·CRD·WVEP 지표를 동일 프레임으로 비교하였다. 국내에서는 대구·광주(혹서), 철원(혹한·결로), 목포(고풍속)가, 국외에서는 Norman Wells/Barentsburg(혹한·결빙), Makkah/Kidal(혹서), Punta Arenas(고풍속), Miami/Bangkok(온난다습·고이슬점)이 대표 지역으로 도출되었다. 난방 18 °C·냉방 20 °C 운전 시 연간 정전기 위험율이 최대 11.38%까지 증가 가능하여 40-55 %RH 습도 때 제어가 요구된다. 그래서 본 연구의 결과는 기후권별 ESS 설계·운전 체크리스트의 체계화에 기여한다.

1. 서론

대용량 ESS는 재생에너지 확대와 전력계통 유연성 확보의 핵심 인프라로 부상하였다. 그러나 컨테이너형 ESS는 지역별 기상 극값(고온·저온·고습·강풍)과 계절 변동성에 직접 노출되어 결로로 인한 절연 열화, 과열에 따른 성능 저하, 돌풍에 의한 구조 손상 및 국부 온도구배 증가 등의 위험에 노출된다. 특히나, 재사용 배터리는 차량에 장착되어 장시간 외기 환경에 노출되어 ESS로 설계시 조금 더 높은 설계 기준을 요구하게 된다.

기존 연구는 셀·모듈 레벨 열관리 또는 단순 열균형 기반의 부하 산정[1-6]에 집중되어 있어 장기 기상 지표의 체계적 관리, 외기 열환경에 따른 열관리, 내부 열환경에 따른 제어 전략을 통합한 실무형 지침 제시에 한계가 있었다[7-12].

본 연구는 날씨데이터 기반의 1차 원리 에너지·수분 균형으로 내부 온습도 응답을 정량화하고, 국내외 다지역의 냉난방 일수, 응결지수, 풍속영향도를 비교하여 일반화, 설계·운전 체크리스트에 대한 지침을 일반화하는 것이다.

2. 본론

2.1 에너지·수분 균형에 따른 내부 온습도 응답 정량화

기후데이터는 국내 9곳과 국외 22곳으로 선정하였으며, 각 지역별 대표기후 및 극한, 극서 기후를 대상으로 지역을 선정하였으며, 기후데이터 형식은 TMY(Typical Meteorological Year Data)을 사용하였다. TMY는 각 지역의 실제 데이터를 축적하기 위해 수년 동안 시간별로 기온, 습도, 일사량 등 대표 기후요소를 측정하고, 전체 측정 기간 동안에 월 평균에 가장 가까운 평균 데이터를 가진 달을 그 달의 TMY 데이터로 선택하고, 각 시간/월/일 기준으로 대푯값을 선정한다. 대체적으로 기후데이터의 대표성을 나타내는 TMY 데이터를 사용하기 때문에 본 연구에서도 가장 신뢰성 있는 TMY 데이터를 사용하였다.

이를 통해 에너지·수분 균형 모델로 내부 열환경 및 부하 시뮬레이션을 수행하였다. 내부 열환경 및 부하 시뮬레이션은 에너지 균형 방정식인 수식 1과 수분 균형 방정식 수식 2을 기반으로 시뮬레이션 할 수 있으며, 이를 기반으로 라플라스 변환을 통해 계산하게 되는데 이는 실제 기후 데이터에 비해 지연상수를 가지고 내부 상태가 응답하므로 실제 유효 열부하를 산정하는데 매우 중요하다.

$$\frac{dT_{zone}}{dt} = \frac{UA}{C_{zone}}(T_{amb} - T_{zone}) + \frac{\dot{m}_{vent}C_{p,air}}{C_{zone}}(T_{vent} - T_{zone}) + \frac{\dot{m}_{inf}C_{p,air}}{C_{zone}}(T_{inf} - T_{zone}) + \frac{\sum \dot{q}_{gain}}{C_{zone}}$$

(전달함수-라플라스변환)

$$G(s) = \frac{T_{zone}(s)}{T_{amb}(s)} = \frac{UA}{C_{zone}s + UA} = \frac{1}{\tau s + 1} \left(\tau = \frac{C_{zone}}{UA} \right)$$

(전달함수-라플라스변환)

$$G(s) = \frac{T_{zone}(s)}{T_{vent,inf,gain}(s)} = \frac{\dot{m}C}{C_{zone}s + \dot{m}C} = \frac{1}{\tau s + 1} \left(\tau = \frac{C_{zone}}{\dot{m}C} \right)$$

[수식 1] 에너지 균형 방정식

$$\frac{d\omega_{zone}}{dt} = \frac{\dot{m}_{vent}}{\rho V}(\omega_{vent} - \omega_{zone}) + \frac{\dot{m}_{inf}}{\rho V}(\omega_{inf} - T_{zone}) + \frac{\sum \dot{\omega}_{gain}}{\rho V}$$

(전달함수-라플라스변환)

$$G(s) = \frac{\omega_{zone}(s)}{\omega_{vent,inf,gain}(s)} = \frac{\dot{m}}{\rho V s + \dot{m}} = \frac{1}{\tau s + 1} \left(\tau = \frac{\rho V}{\dot{m}} \right)$$

[수식 2] 수분 균형 방정식

이를 통해, 열 에너지 균형, 수분(습기) 균형, 경제조건 및 산출 항목을 산정할 수 있다.

열 에너지 균형은 내부 구역 온도는 외피 열관류(UA), 환기/침기 열이동, 내부발열(배터리 발열/일사 획득)로 지배되며, 시스템 시정수 $\tau = \frac{C}{UA}$ 가 피크 응답과 부하를 결정하게 된다.

수분(습기)균형은 절대습량이 환기·침기 유량과 내부 수분발생으로 상대습도와 이슬점온도의 교차로 겨울 발생 여부를 판정한다.

경계조건 및 산출항목은 시간별 외기(온도·상대습도·이슬점온도·일사·풍속·풍향)를 입력하였으며 내부 열환경 상태(온도·습도), 침기 손실, 감열부하 등으로 산출한다.

최종 적으로 내부 열환경 및 부하 시뮬레이션을 수행

하여 내외부 조건에 대한 평가 기준은 HDD(Heating Degree Days), CDD(Cooling Degree Days), CRD(Condensation Risk Days), WVEP(Wind Velocity Effect Point)로 수립하였다.

먼저 표1, 표2와 같이 국내 9곳, 국외 22곳을 분석한 결과 혹서형, 혹한·결빙형, 고풍속형, 온난다습형으로 분류할 수 있다.

혹서형은 국내는 대구와 광주, 국외는 Saudi Arabia - Makkah와 Mail-Kidal이 대표지역이다. 이 지역들은 높은 CDD와 일사·내부 발열이 결합되어 고반사 차열 지붕 및 벽체 설계가 필요하여 고온 COP 유지형 냉방 및 증발 보조 설비가 요구된다.

혹한·결빙형은 국내는 철원, 국외는 Canada - Norman Wells, Norway - Barentsburg가 대표지역이다. 이 지역은 높은 HDD와 CRD가 요구되어, 프리히터와 전열교환 환기(제습 겸용) 설비가 요구되며 출입문 측

[표 1] 국내 기후데이터 기반 HDD, CDD, CRD, WVEP 분석 결과

No.	Location	Heating & Cooling DegreeDays		Condensation Risk Days	Wind Velocity Effect Point			
		HDD	CDD	CRD	Total	Med	High	Super-High
		[°C·Day]	[°C·Day]	[Days]	[Days]	[Days]	[Days]	[Days]
1	서울	2,891.62	643.56	31.28	106.44	132.33	37.15	5.25
2	부산	1,630.26	928.68	35.69	99.69	236.47	39.94	4.20
3	대구	2,012.93	980.80	57.45	78.48	156.90	14.98	0.24
4	광주	1,933.44	958.78	144.95	35.01	65.96	0.57	0.08
5	대전	2,321.27	891.98	61.27	122.36	106.59	4.32	0.00
6	울산	2,351.27	637.40	38.22	85.59	106.86	24.50	3.63
7	철원	3,061.71	692.16	143.92	84.88	75.78	1.62	0.00
8	강릉	2,570.53	580.58	28.47	106.73	144.80	46.16	4.89
9	목포	2,281.17	685.12	70.56	139.07	182.88	107.97	12.06

[표 2] 국외 기후데이터 기반 HDD, CDD, CRD, WVEP 분석 결과

No.	Location	Heating & Cooling DegreeDays		Condensation Risk Days	Wind Velocity Effect Point			
		HDD	CDD	CRD	Total	Med	High	Super High
		[°C·Day]	[°C·Day]	[Days]	[Days]	[Days]	[Days]	[Days]
1	Canada (Norman Wells)	8,722.96	57.40	151.17	124.07	172.15	65.20	6.93
2	USA (San Francisco)	1,824.87	31.74	68.45	146.06	158.88	120.81	24.11
3	USA (Miami)	64.94	2,369.47	42.58	183.26	193.54	127.67	6.00
4	USA (Amarilo)	2,591.88	747.62	42.14	182.63	133.95	173.74	46.31
5	Brazil (Sao Paulo)	322.61	760.66	91.05	151.15	193.12	81.15	5.24
6	Argentina (Buenos Aires)	941.41	731.08	24.65	154.36	182.77	108.38	11.62
7	Chile (Punta Arenas)	4,224.34	0.00	89.53	139.57	118.24	143.03	72.14
8	Rusia (Aleksandrovskoe)	7,449.68	76.80	110.40	133.45	172.37	60.77	5.78
9	Mongolia (Ulan Bator)	7,455.09	57.24	68.09	107.48	135.62	41.03	3.93
10	Saudi Arabia (Makkah Mecca)	0.00	4,615.40	0.06	161.89	95.44	2.86	0.00
11	Nepal (Kathmandu)	842.83	904.06	140.06	138.78	188.76	52.75	2.32
12	Thailand (Bangkok)	0.00	3,542.47	36.96	119.60	61.81	5.49	0.18
13	China (Shanghai)	1,832.24	1,020.19	83.93	139.57	193.35	49.29	1.56
14	Japan (Sapporo)	3,781.92	231.70	39.20	122.75	151.30	43.95	4.85
15	Norway (Barentsburg)	8,496.75	0.00	165.85	128.72	166.81	106.61	21.26
16	United Kingdom (London)	2,712.13	76.38	80.45	134.34	174.94	97.23	14.13
17	Germany (Berlin)	3,279.21	147.37	67.78	128.86	160.41	112.28	26.58
18	Spain (Madrid)	2,040.44	548.86	38.02	115.36	140.46	41.32	5.35
19	Egypt (Cairo)	396.92	1,610.71	0.00	143.03	193.94	74.58	4.66
20	Uganda (Kampala)	0.00	1,280.14	117.46	139.41	162.80	112.33	24.19
21	Rep. South Africa (Cape Town)	959.29	286.04	85.31	116.14	136.03	112.41	54.51
22	Mail (Kidal)	4.93	3,938.22	0.00	134.11	181.99	37.87	1.06

에서 전실(Air-Lock) 및 열교 차단 벽체 설계도 요구된다.

고풍속형은 국내는 목포, 국외는 Chile-Punta Arenas로 WVEP 고구간이 집중되며, 환기구의 방향 최적화 및 루버내풍속 저감 및 장비 앵커·프레임 보강이 요구된다.

마지막으로 온난다습형은 국내는 존재하지 않으며, 국외는 USA-Miami와 Thailand-Bangkok으로 연중 고이슬점이 유지되어 제열제습(44~55% 습도 제어)와 응축수 배수 장치 및 차단기함체/배선덕트에 정전기 발생 억제를 위한 열교차단 설비가 요구된다.

2.2 냉난방부하 계산을 통한 영향도 분석

대표지역으로 선정된 지역을 대상으로 추가 냉난방부하를 배터리 내부 발열 조건이 전시간 운영한다는 조건으로 $500 W/m^2$ 로 산정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

난방조건은 18°C, 냉방조건은 20°C 운전으로 가정하고 무운전 대비 연간 위험도(차열·단열·기밀·환기·제습, 풍속 등) 조건을 확인하였다.

국내외 모두 시뮬레이션 결과 무운전 대비 연간 정전기 위험율이 최대 11.38%가 상승하므로 습도 44~55% 제어와 적정 양압·외기 최소화, 접지·대전방지재, 도어·케이블 글랜드 기밀 향상 등의 설계 기준 마련이 필요해 보인다.

[표 3] 국내 대표지역 4곳의 연간 위험도 조건 해석 결과

No.		01	02	03	04
Nation		South Korea	South Korea	South Korea	South Korea
Location		Gwangju	Daegu	Chelwon	Mokpo
Heating & Cooling NoOperation Condition	Max. Temperature	71.6	72.4	69.7	69.5
	min. Temperature	20.0	20.0	20.0	20.0
	Max. Humidity	50.0	50.0	50.0	50.0
	min. Humidity	0.3	1.0	1.0	3.0
	Max. Qheating	0.0	0.0	0.0	0.0
	Max. Qcooling	0.0	0.0	0.0	0.0
	Infration Loss	495.3	495.2	501.9	491.5
	Condensation Risk Rate	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Electrostatic Risk Rate	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
Heating & Cooling Operation Condition	Max. Temperature	20.0	20.0	20.0	20.0
	min. Temperature	20.0	20.0	20.0	20.0
	Max. Humidity	100.0	100.0	100.0	100.0
	min. Humidity	2.6	4.2	2.3	10.5
	Max. Qheating	0	0	0	0
	Max. Qcooling	0.663	0.674	0.641	0.626
	Infration Loss	57.3	59.3	104.3	78.3
	Condensation Risk Rate	67.4%	67.7%	75.6%	76.2%
Electrostatic Risk Rate	4.8%	5.6%	5.8%	4.9%	
Overall Analysis	Increased Rate of Condensation Risk	-0.326	-0.323	-0.244	-0.238
	Increased Rate of Electrostatic Risk	0.0475	0.0555	0.058	0.049

[표 4] 국내 대표지역 4곳의 연간 위험도 조건 해석 결과

No.		01	02	03
Nation		Canada	Norway	Saudi Arabia
Location		Norman Wells	Barentsburg	Makkah Mecca
Heating & Cooling NoOperation Condition	Max. Temperature	66.2	54.7	77.1
	min. Temperature	7.1	18.3	20.0
	Max. Humidity	50.0	50.0	50.0
	min. Humidity	0.6	0.7	3.7
	Max. Qheating	0.0	0.0	0.0
	Max. Qcooling	0.0	0.0	0.0
	Infration Loss	537.1	531.9	449.8
	Condensation Risk Rate	100.0%	100.0%	100.0%
Electrostatic Risk Rate	4.7%	0.8%	0.0%	
Heating & Cooling Operation Condition	Max. Temperature	20.0	20.0	20.0
	min. Temperature	18.0	18.2	20.0
	Max. Humidity	100.0	53.1	100.0
	min. Humidity	0.3	1.4	50.0
	Max. Qheating	0.1	0.0	0.0
	Max. Qcooling	0.5	0.4	0.7
	Infration Loss	313.5	310.4	130.8
	Condensation Risk Rate	93.6%	99.8%	25.6%
Electrostatic Risk Rate	11.4%	11.9%	0.0%	
Overall Analysis	Increased Rate of Condensation Risk	-0.064	-0.002	-0.744
	Increased Rate of Electrostatic Risk	0.0673	0.1109	0

3. 결론

본 연구는 에너지·수분 균형 모델과 HDD/CDD/CRD/WVEP 지표를 통합하여 국내·국외 다지역을 혹한·혹서·고풍속·고습의 4대 페르소나로 일반화하였고, 시나리오별 설계·운전 체크리스트를 제시하였다. 운전 모드에서는 정전기 위험(최대 11.38%)을 고려한 습도 제어(40-55 %RH)가 핵심이며, 지역별로 차열·단열·기밀·환기·제습 패키징이 성능과 안전을 좌우한다. 향후 실측 기반 파라미터 동정, 3D 열유동-구조 연성, AI 예측 제어(피크/결로 예측)로 확장할 것을 제안한다.

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및
산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한
연구임(과제번호 : 20031919)

참고문헌

[1] L.-D. Tai et al., “Advances in the Battery Thermal Management Systems of Lithium-Ion Batteries,” *Batteries*, vol. 11, no. 6, 2025.

[2] M. Murugan et al., “A Comprehensive Review of Thermal Management Methods for EV Battery Packs,” *Energy Science & Engineering*, 2025.

[3] H. Togun et al., “A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025.

[4] H.-Y. Park et al., “The Monitoring and Management of an Operating Environment to Enhance the Safety of a Container-Type ESS,” *Sensors*, vol. 23, no. 10, 2023.

[5] SINTEF, “Case Study of Ventilation Solutions and Strategies for Li-ion Battery Rooms,” *Tech. report*, 2025.

[6] Q. Hu et al., “Explosion-venting overpressure structures and hazards of TR gas of lithium-ion battery in ESS,” *Journal of Energy Storage*, 2024.

[7] W.-K. Kim et al., “Water Condensation in Traction Battery Systems,” *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019.

[8] ISO, “ISO 52016-1:2017 — Energy performance of buildings,” 2017.

[9] G. De Luca et al., “Improvements of simplified hourly models for the energy performance evaluation... (EN

ISO 52016-1 NA),” *Energy and Buildings*, 2022.

[10] W. P. Olis et al., “Impact of Heating and Cooling Loads on Battery Energy Storage Systems,” *NREL/OSTI report*, 2023.

[11] W. Olis et al., “Impact of heating and cooling loads on battery energy storage systems,” *Energy Conversion and Management*, 2023.

[12] ASHRAE TC 9.9, *Thermal Guidelines for Data Processing Environments (5th ed. quick ref.)*, 2023; *Datacom series resource page*, 2025.