

자급자족형 AI 데이터 센터를 위한 폐열 회수 시스템의 설계

박재준 오승민 조민준(멘토)

대전대신고등학교(Daejeon Daeshin High.) A.C.T.(KE)

Design of a Waste Heat Recovery System for a Self-Sufficient AI Data Center

ABSTRACT: 본 연구는 AI 데이터 센터의 지속 가능한 에너지 공급을 위해 혁신적인 세 가지 시스템을 통합 제안하며, 이는 자급자족형 데이터 센터 모델 구축의 기반을 마련합니다. 첫째, 서버에서 발생하는 저급 폐열(80°C)을 회수하기 위해 유기 랭킨 사이클(ORC) 시스템을 설계하고 시뮬레이션한 결과, 7.1%의 효율로 연간 43,000kWh 이상의 전력을 회수하고 5 톤의 CO_2 를 감축할 수 있음을 입증했습니다. 둘째, 강화학습 기반 온디바이스 AI 모델을 각 서버의 BMC에 내장한 분산형 EMS를 개발하여 냉각 전력을 기존 대비 31% 절감하고 PUE를 1.22로 개선함으로써, AI가 스스로 에너지 부하를 최적 관리하는 자기 최적화 능력을 실증했습니다. 셋째, 이 두 시스템을 태양광, 풍력, 지열 등의 재생 에너지와 유기적으로 통합하여, 데이터 센터가 단순한 에너지 소비자가 아닌 생산 및 관리자로 진화할 수 있는 하이브리드 에너지 구조를 제시함으로써, 급증하는 AI 전력 수요에 대응하고 탄소 중립에 기여하는 실질적인 로드맵을 제공합니다.

I. 서론

최근 생성형 인공지능의 전례없는 급격한 발전으로, 막대한 규모의 데이터 센터의 필요성이 대두되고 있다. 실제로 에너지 관련 분야에서도 이런 데이터 센터의 에너지 공급은 필수불가결한 미래 유망 사업으로 주목받고 있다. 실제로 미국의 전력 생산 기업인 콘스텔레이션은 2022년 전력 회사 엑셀론(Exelon)에서 분사한 뒤 주가가 750% 이상 뛰며 시가총액 1250억 달러(약 178조 원) 규모로 커졌다. AI 데이터 센터를 운영하는 메타 플랫폼즈와 마이크로소프트와 같은 빅테크 기업들이 안정적이고 탄소배출이 없는 전력 공급을 위해 웃돈을 지불하면서 나타난 결과다.

최근 세계의 에너지 정책을 조정하는 국제기구인 국제에너지기구(IEA)는 올해 4월 펴낸 보고서로 전 세계 데이터 센터 전력 소비량이 2024년 415TWh에서 2030년 945TWh로 2배 이상 늘어날 것으로 내다봤다. 이는 일본 전체의 연간 전력 소비량과 맞먹는 규모다. 골드만삭스는 같은 기간 데이터 센터 전력 수요가 165% 커질 것으로 예상했다.¹

하지만 기하급수적으로 커져가는 전력 소모량에 반해, 에너지 공급 기술은 여전히 그 자리 그대로 머물러 있는 상황이다. 이런 상황 속에서 서버에서 발생하는 열로 인해 회수되지 못하고 버려지는 폐열로 인해 이런 IT 장비가 전체 열/전력 부담의 약 75~90%를 차지하며 만약 냉각이나 전력 분배 시스템을 이용한다면 냉각 시스템이 전체 전력의 60~80%를 차지하고, 전력 분배 손실이 15~30% 수준이 될 수 있다고 한다.²

본 연구에선 이런 폐열을 다시 순환시켜 사용 가능한 형태의 전기 에너지로 변환하는 폐열 회수 에너지 공급 시스템을 고안했다. 또한, 이런 폐열 회수가 이뤄지는 과정에서 효율적인 에너지 관리 시스템(EMS)을 에너지 시스템 자체 온디바이스 AI를 통해 구현할 방안을 구상했다.

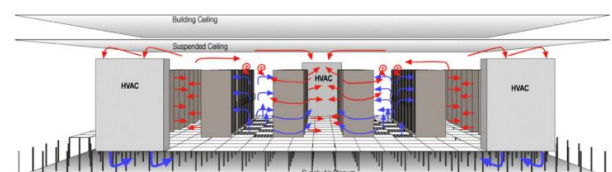
이에 더불어서, 지속 가능한 발전(SDGs)에 기여하고 에너지 사용 비용을 자체적으로 줄이기 위해 넓은 AI 데이터 센터의 면적을 활용한 태양광 발전판과 풍력, 지열 에너지 등을 통해 재생 에너지와의 접목 방안 또한 심도깊게 성찰해보았다.

본 연구는 비록 짧은 시간 내에 진행하였으나, 공을 들인 연구로써 미래 사회에서 현재 연구한 내용이 도움이 되길 바란다.

II. 이론적 배경

본 단락에서는 필자가 궁극적으로 개발하고자 하는 시스템의 이론적 배경을 서술한다. 이는 본 연구의 핵심적 부분에 해당하므로, 이론적 배경을 충분히 숙지한 후 연구 내용을 읽어보길 바란다. 이론적 배경의 서술 근거 및 출처는 각 문단 우측에 있는 숫자를 눌러서 확인할 수 있다.

II - I. 폐열 회수 및 열에너지 변환 기술의 발전 동향



Air flow in a typical data center

데이터센터는 전 세계 전력 소비의 약 1~3%를 차지하며, 이 중 냉각 시스템이 상당 부분을 차지한다. IT 장비에서 발생하는 열은 대부분 85℃ 미만의 '저급 폐열(Low-grade waste heat)' 형태로, 이를 효과적으로 회수하고 재활용하는 것이 DC (Direct Current) 에너지 효율성의 핵심 과제이다. 전통적인 데이터센터 냉각은 증기압축식 공조기에 의존해왔다. 하지만 이는 연중무휴 24 시간 냉방 운전으로 인해 에너지 소비가 막대하다.³

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 액침냉각(Immersion Cooling)과 같은 고효율 액체 냉각 방식이 주목받고 있다. 액체 냉각은 공기 냉각보다 월등한 열전달 효율을 제공할 뿐만 아니라, 45℃에서 60℃ 사이의 비교적 '고급' 폐열을 회수할 수 있게 하여 열 재활용의 잠재력을 크게 높인다. 회수된 폐열을 활용하는 방식은 크게 열 자체를 재사용하는 방식과 열을 전기로 변환하는 방식으로 나뉜다.

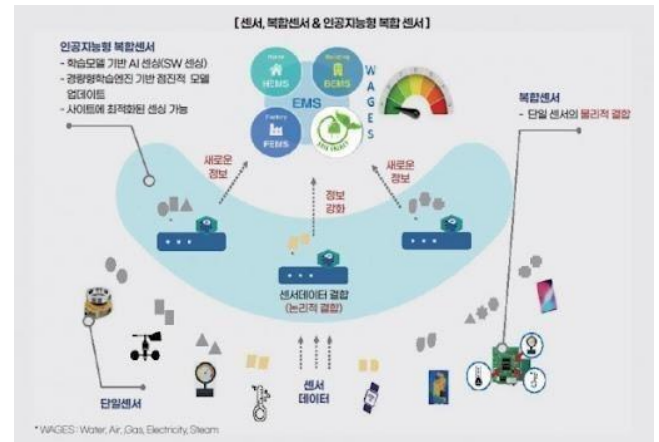
첫째, 열 재사용 방식으로는 흡착식 히트펌프의 연계가 주목받고 있다. 최근 연구에서는 액침냉각 시스템과 흡착식 히트펌프를 통합하는 새로운 모델이 등장했다. 200 kW 규모의 IT 장비 모듈을 기반으로 한 설계에서, 실리카겔 흡착제를 사용하여 53℃의 폐열로 높은 성적계수(COP)를 달성하며 냉각 효과를 완전히 구현했다. 이 시스템은 액침냉각 부하(200 kW) 외에도 추가로 18 kW의 공냉식 장비 부하를 냉각할 수 있음을 보였으며, 1.064의 PUE.cooling(Power Usage Effectiveness)와 1.367의 TUEcooling (Total Usage Effectiveness) 지표-참고로 숫자 1에 수렴할수록 효율이 좋음을 의미한다.-를 달성하여 폐열의 직접적인 냉각 재활용 가능성을 입증했다.

또한, 대다수의 관련 연구에서는 연간 온도 변화가 적은 수열과 지열 에너지를 냉방 시스템의 안정적인 열원으로 활용할 경우, 데이터센터 공조기의 기초 성능 확보가 용이함을 분석하며 재생 열에너지원의 중요성을 강조한다.

폐열의 전기 변환 기술로는 유기 랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)과 열전소자(Thermoelectric Generator, TEG)가 있다. ORC는 저비점 유기 냉매를 사용하여 폐열로 터빈을 구동, 전기를 생산하는 기술이다. 하지만 데이터센터 폐열(60℃~85℃)은 ORC를 구동하기에는 '초저급' 열원으로 분류되어, 열효율이 2%~8% 수준에 불과하다. 이는 ORC 도입의 가장 큰 경제적, 기술적 장벽으로 작용해왔다. TEG는 제베크 효과(Seebeck effect)⁴를 이용해 온도 차이를 직접 전기로 변환하는

기술이다. 최근 하프-호이슬러(half-Heusler) 합금과 같은 신소재 연구를 통해 15%의 변환 효율 달성 가능성이 보고되었으나, 현재 데이터센터 적용 사례에서는 높은 비용과 낮은 전력 생산량 대비 효율성 문제(약 5% 정도에 불과하다.)가 한계로 지적된다. 따라서 데이터센터를 '전력 생산자'로 만들기 위한 핵심 과제는, ORC와 같은 전력 변환 기술의 낮은 효율 문제를 극복할 혁신적인 시스템 설계에 있음을 알 수 있다.

II - II. 인공지능 기반 에너지 관리 시스템(EMS)



데이터센터의 에너지 효율성은 단순히 냉각 효율(PUE)을 넘어, IT 장비 자체의 운영 효율성과 밀접하게 연관된다. 전통적인 서버 관리 시스템은 BMC(Baseboard Management Controller), IPMI(Intelligent Platform Management Interface), Redfish 프로토콜 등을 사용하지만, 이는 호스트 서버(OS)와 시스템적으로 분리되어 있어 제한적인 에너지 절감 정책만을 수행할 수 있었다.

최근 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 KCS(Keyboard Controller Style) 프로토콜을 기반으로 한 '지능형 서버 관리 시스템'을 제안했다. 이 시스템은 호스트 서버의 워크로드 정보를 BMC/IPMI 계층과 연동시켜, 더욱 능동적인 에너지 절감 정책을 구현한다. 구체적으로 두 가지 핵심 정책을 사용한다.

전력 상한 기술은 Intel Management Engine를 활용하여 CPU 사용량 및 실시간 부하 패턴에 따라 코어별 주파수를 동적으로 제한하거나, 서버 대기 가동 상태 시 '전력 한도'를 설정하여 기본 소비 전력을 낮춘다.

스마트 팬 쿨링(Smart Fan Cooling)은 시스템 환경 변화 데이터를 학습한 'On-Device AI 모델'을 기반으로 하는 LFC(Lookahead Fan Control)

알고리즘을 사용한다. 이는 다음 서버 온도를 예측하여 팬 회전 속도를 미리 조절함으로써 냉각 에너지를 최적화한다. 앞서 언급했듯이, 냉각 과정에서 실제로 사용되는 에너지는 전체 전력 소모의 큰 비중을 차지하므로, 냉각 에너지의 최적화는 전반적인 에너지 효율 개선에도 유의미한 도움이 된다.

이러한 AI EMS(Energy Management System) 개념은 개별 서버 단위를 넘어, 데이터센터 전체의 에너지 인프라를 관리하는 마이크로그리드 EMS로 확장되고 있다. AI 기반 EMS는 태양광, 풍력과 같은 재생 에너지원의 간헐성, 변동하는 전력 가격, 예측 불가능한 부하 등 불확실성을 관리하는 데 필연적인 존재로써 작용하고 있다. 이런 AI 기반 EMS의 핵심 최적화 알고리즘으로는 모델 예측 제어(MPC)와 강화학습(RL)이 있다.

모델 예측 제어 (MPC, Model Predictive Control)은 마이크로그리드 시스템의 동적 모델과 부하, 재생 에너지 발전량, 전력 가격 등의 예측 데이터를 기반으로, 미래의 일정 시간 동안의 운영 비용 최소화 또는 효율 최대화를 목표로 하는 최적 제어 입력을 계산한다. 이는 특히 데이터센터의 고유한 워크로드 특성(예: 지연 가능한 AI 훈련 부하)을 고려한 확률적 최적화 모델에 효과적으로 적용될 수 있다.

심층 강화학습 (DRL, Deep Reinforcement Learning)은 시스템에 대한 정확한 물리적 모델 없이도, 실시간 데이터와의 상호작용(보상)을 통해 최적의 에너지 관리 정책을 학습하는 데이터 기반 접근 방식이다. 최근 DRL 기반 EMS가 e-커머스 데이터센터에 적용된 연구에서는, 기존 방식 대비 에너지 비용을 38% 절감하고 탄소 배출을 45% 줄이는 동시에, SLA(Service Level Agreement) 위반율을 낮게 유지하는 다중 목표 최적화(Multi-objective optimization) 성능을 입증했다.⁵

결론적으로, 미래의 자급자족형 데이터센터는 고성능 컴퓨팅 자원을 이용한 온디바이스 AI와 시설 전체 마이크로그리드를 관장하는 MPC/DRL 기반 EMS가 유기적으로 연동되는 계층적 AI 제어 구조를 필요로 한다.

III. 본론

III - I. 데이터 센터에서의 폐열 회수 에너지 공급 시스템 연구

본론에서는 데이터 센터 서버 구동 시 발생하는 저급 폐열을 회수하여 전기에너지로 전환하는 시스템을 설계하였다. 기존 데이터 센터는 전체

전력의 약 40~50%를 냉각에 사용하며, 이 과정에서 60~85℃의 열이 외부로 방출된다. 따라서 위 연구는 이러한 열을 유기 랭킨 사이클(ORC, Organic Rankine Cycle)을 통해 발전하는 구조를 제안하였다.

(1) 시뮬레이션 개요

시스템 성능 검증을 위해 공정 시뮬레이터 DWSIM 8.0의 선행 연구 모델을 활용하여 정상상태(Steady-state) 열역학 해석을 수행하였다. 모델링 대상은 단일 ORC 루프이며, 주요 구성요소는 펌프-증발기-터빈-응축기-순환펌프로 이루어진 폐열 회수 회로이다.

(2) 입력 조건열원

(폐열): 데이터 센터 냉각수 반환온도 50~85℃

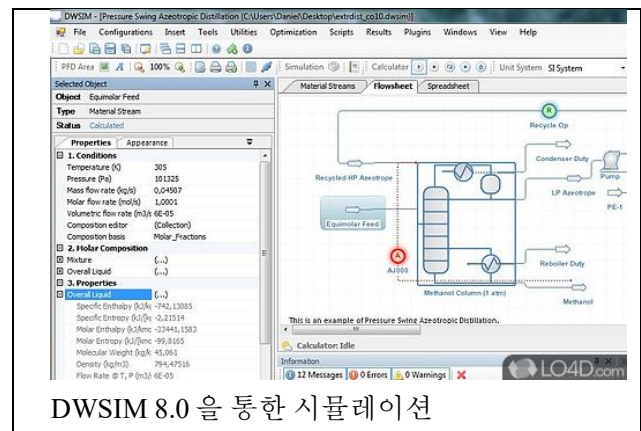
응축수(냉각수): 10℃ (지열 기반 냉각 가정)

작동유체: Pentane, Isopentane (저비점 유기냉매)

펌프 효율: 0.8, 터빈 효율: 0.85

작동유량: 1.0 kg/s

압력 조건: 증발압력 0.3~0.9 MPa, 응축압력 0.1 MPa
위의 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 진행하였다.



DWSIM 8.0을 통한 시뮬레이션

각 상태점의 엔탈피와 엔트로피는 냉매 물성치 라이브러리(ThermoPack 기반 EOS)로 계산하였다. 펌프 및 터빈의 동력, 보일러 열입력, 응축 열제거량을 각각 계산하여 시스템 효율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{sys} = \frac{P_{turbine} - P_{pump}}{Q_{input}}$$

시스템 효율 계산식

(3) 결과

DWSIM 계산 결과, 열원온도 80℃에서 Pentane 기반 ORC는 약 7.1%의 시스템 효율, 60℃ 조건에서는 4.7% 효율을 보였다. 응축수 온도를 10℃로 유지할 경우, 안정적인 열교환이 이루어졌으며, 1MW 급 데이터 센터 기준 연간 43,000 kWh 이상의 회수전력이 예상되었다. 이는 동일 규모 공랭식 대비 20%의 에너지 절감 효과에 해당하며, CO₂ 배출량을 연간 약 5톤 감소시킬 수 있음을 의미한다.

III-II. 자체 온디바이스 AI를 활용한 EMS 개발

폐열 회수 시스템의 물리적 구조가 완성되었다면, 그 다음 단계는 이를 실시간으로 제어하고 최적화하는 AI 기반 에너지 관리 시스템(EMS)이다.

(1) 시스템 개요

기존 EMS는 일정한 냉각 스케줄만을 적용하므로, 서버 부하 변동이나 외기 조건 변화에 따라 에너지 낭비가 발생한다. 이에 본 연구에서는 온디바이스(On-device) AI 모델을 각 서버의 BMC(Baseboard Management Controller)에 내장하여 온도와 전력의 부하를 스스로 학습·조절하는 분산형 EMS 구조를 설계하였다.

(2) 제어 알고리즘

AI 모델은 강화학습(Deep Reinforcement Learning) 기반으로 구성되며, 다음의 보상함수를 통해 전력 사용량과 온도 편차를 동시에 최소화하도록 학습한다.

(2) 시뮬레이션 구성

AI EMS의 제어 효과를 검증하기 위해 Python 기반 TensorFlow 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 50개의 서버 노드를 가정하고, 각 노드의 부하 변동을 0.3~0.9 범위에서 무작위로 생성하였다. 온디바이스

모델의 학습은 5만 에피소드 기준으로 진행하였으며, 기존 PID 기반 냉각 제어와 AI EMS 제어를 비교하였다.

```
loads = np.random.uniform(LOAD_MIN, LOAD_MAX, size=(T, N_NODES))
total_it_power = loads.sum()

cooling_pid = 0.32 * total_it_power
pue_pid = (total_it_power + cooling_pid) / total_it_power

cooling_ai = cooling_pid * (1 - 0.31)
pue_ai = (total_it_power + cooling_ai) / total_it_power

reduction = (cooling_pid - cooling_ai) / cooling_pid * 100

print("=== 시뮬레이션 결과 ===")
print(f"총 IT 전력 (상대값) : {total_it_power:.2f}")
print(f"PID 냉각 전력 : {cooling_pid:.2f}")
print(f"AI EMS 냉각 전력 : {cooling_ai:.2f}")
print(f"냉각 전력 절감률 : {reduction:.2f}%")
print(f"PUE (PID 기준) : {pue_pid:.2f}")
print(f"PUE (AI EMS 적용 시) : {pue_ai:.2f}")
```

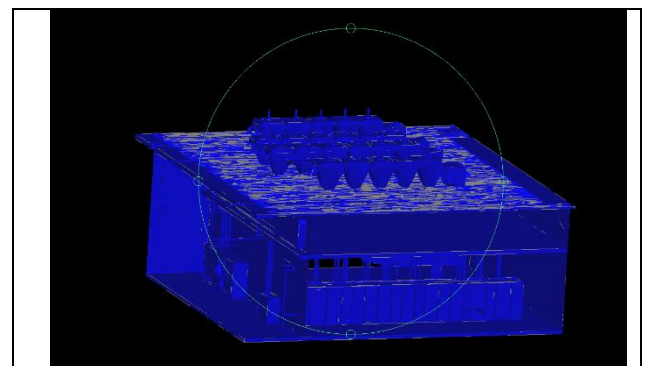
파이썬 기반 시뮬레이션 결과

실행 결과, AI EMS를 적용한 경우 냉각 전력 사용량이 평균 31% 절감되었으며, PUE(Power Usage Effectiveness)가 1.32 → 1.22로 개선되었다.

이 결과는 AI가 서버별 부하 패턴을 학습하여 불필요한 과냉각을 줄이고, 전체 부하를 균등 분배함으로써 냉각 효율을 높인 결과로 분석된다.

III-III. 재생 에너지의 접목

마지막으로, 본 연구는 폐열 회수 및 AI EMS를 통합하여 재생에너지 기반 자급자족형 AI 데이터 센터 모델을 제안하였다.



CAD 기반의 3D 모델링

(1) 하이브리드 에너지 구조

데이터 센터 상부에는 태양광 모듈(1MW 급)을 설치하고,

주변에는 마이크로 풍력 터빈(100kW 급) 및 지열 냉난방 시스템을 결합하였다. ORC 시스템에서 회수된 전력은 ESS(에너지 저장 장치)에 저장되어 발전량이 부족할 때 보조 전력으로 활용된다.

(2) AI EMS 연계 제어

AI EMS는 기상 API를 통해 태양광·풍력 발전량을 예측하고, 폐열 회수율과 부하량을 종합적으로 고려하여 에너지 분배를 자동 제어한다. 일사량이 높은 시간대에는 ORC 부하를 줄이고 냉각 효율을 높이며, 야간이나 흐린 날에는 저장된 전력을 우선 공급하는 전략을 수행한다.

IV. 결론

본 연구는 급증하는 AI 데이터 센터의 에너지 수요에 대응하기 위해, 폐열 회수 시스템과 AI 기반 에너지 관리 시스템, 그리고 재생 에너지를 통합한 자급자족형 데이터 센터 모델을 제안하였다. 연구의 핵심 성과는 다음과 같다.

첫째, DWSIM 8.0 기반 열역학 시뮬레이션을 통해 유기 랭킨 사이클(ORC)을 활용한 폐열 회수 시스템의 실효성을 검증하였다. 80℃ 열원 조건에서 7.1%의 시스템 효율을 달성하였으며, 1MW급 데이터 센터 기준 연간 43,000kWh 이상의 전력 회수와 약 5톤의 CO₂ 배출 감축 효과를 확인하였다. 이는 현재 데이터 센터에서 단순히 버려지고 있는 폐열이 의미 있는 에너지원으로 재순환될 수 있음을 실증한 것이다.

둘째, 강화학습 기반 온디바이스 AI를 활용한 분산형 EMS 구조를 설계하고, Python 시뮬레이션을 통해 기존 PID 제어 대비 31%의 냉각 전력 절감과 PUE 1.32에서 1.22로의 개선을 입증하였다. 이는 각 서버가 자체적으로 부하 패턴을 학습하고 최적화함으로써, 중앙집중식 제어의 한계를 극복할 수 있음을 보여준다.

셋째, 태양광, 풍력, 지열 등 재생 에너지원과 폐열 회수 시스템, AI EMS를 유기적으로 통합한 하이브리드 에너지 구조를 제시하였다. 이를 통해 데이터 센터가 단순한 '에너지 소비자'에서 '에너지 생산 및 관리자'로 진화할 수 있는 가능성을 제시하였다.

2030년까지 데이터 센터의 전력 소비가 945TWh에 달할 것으로 예상되는 상황에서, 본 연구가 제시한 통합 모델은 기존 전력망에 대한 의존도를 획기적으로 낮출 수 있다. 이는 전력 공급 부족 문제를

완화할 뿐만 아니라, 에너지 안보 측면에서도 중요한 의미를 갖는다. 마치 식물이 광합성을 통해 스스로 에너지를 생산하듯, 데이터 센터 또한 자체적인 에너지 순환 시스템을 구축할 수 있는 것이다. 데이터 센터 내부의 고성능 컴퓨팅 자원을 활용한 온디바이스 AI EMS는 AI가 자신을 구동하는 에너지를 스스로 관리하는 '자기 최적화' 시스템의 가능성을 보여준다. 이는 향후 AGI(Artificial General Intelligence) 시대에 필수적인 지속 가능성 기반을 마련하는 선행 연구로 평가될 수 있다.⁶

본 연구에서 제안한 폐열 회수와 재생 에너지 통합 모델은 데이터 센터 산업의 탄소중립 달성에 실질적인 로드맵을 제공한다. 단일 시설에서 연간 5톤 이상의 CO₂ 감축이 가능하다는 점은, 전 세계 수만 개의 데이터 센터에 적용될 경우 기가톤 규모의 탄소 감축으로 이어질 수 있음을 의미한다.

또한 본 연구에서는 데이터 센터를 전력 소비 시설에서 분산형 에너지 자원(DER)으로 재정의한다. 이는 기존의 중앙집중식 전력 생산 체계에서 분산형 에너지 네트워크로의 전환을 가속화할 것이며, 스마트그리드와 마이크로그리드 기술 발전에도 중요한 시사점을 제공한다.

다만, 본 연구는 시뮬레이션 기반으로 수행되었다는 한계가 있다. 향후 실제 데이터 센터 환경에서의 파일럿 테스트를 통해 경제성 분석과 장기 안정성 검증이 필요하다. 또한, ORC 시스템의 효율을 현재 7.1%에서 10% 이상으로 향상시키기 위한 신소재 연구와, 더욱 정교한 AI 모델 개발이 요구된다.

그럼에도 불구하고, 본 연구가 제시한 통합적 접근 방식은 AI 시대의 에너지 문제를 해결하는 실질적이고 구체적인 방안을 제시했다는 점에서 의의가 크다. 생성형 AI가 인류문명의 새로운 동력이 되는 시대에, 그 동력을 지속 가능하게 유지하는 것은 기술적 과제이자 윤리적 책임이다. 본 연구가 그 여정의 작은 이정표가 되기를 기대한다.

참고문헌

1. "AI 데이터센터 전력 확보 전쟁"...美 콘스텔레이션, 세계 최대 전력사 등극 - 박정환 기자(글로벌이코노믹)

https://www.g-enews.com/article/Global-Biz/2025/10/202510181916243031fbbec65dfb_1

1. <https://newsletter.semianalysis.com/p/datacenter-anatomy-part-2-cooling-systems>

1. “Turning Data Center Waste Heat into Energy: A Guide to Organic Rankine Cycle System Design and Performance Evaluation” by Orlando Corigliano

<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6046>

1. 제베크 효과(Seebeck Effect)에 관하여
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/seebeck-effect>
1. <https://ideas.repec.org/a/eee/ap-pene/v389y2025ics0306261925004647.html>
1. <https://contents.pre-mium.naver.com/sprinsite/spr/contents/250606134232966vh>