



Review Paper

Current and Prospects of Waste Heat Utilization and Cooling Technology in Data Centers

Jaeryang Park[#] · Hojin Jang[#] · Sinhyeok Choi[#] · Ryeong Jung[#] · Sokhee P. Jung[†]

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam University, Gwangju, Republic of Korea

(Received October 14, 2022; Revised November 24, 2022; Accepted November 24, 2022)

Abstract : As the COVID-19 pandemic and interest in the virtual world rapidly increase, the data usage in the current society is rapidly increasing to an unprecedented level, and the need for expansion of data centers to handle it is also rapidly increasing. Data centers operate continuously and consume a lot of power in operation. As electricity consumption increases, the increase in greenhouse gas emissions adversely affects the environment, so the increase in data centers inevitably affects the climate environment. Typical technologies that can reduce power consumption in data centers are waste heat energy utilization and outdoor air conditioning. By analyzing the cases of major countries for the two technologies, the technological direction beneficial to Korea was reviewed. As Korea's outdoor air conditioning standards are relaxed, the number of outdoor air conditioning facilities in Korea is increasing. However, the Korean government's practical support for waste heat energy utilization is extremely limited. By analyzing policy cases for waste heat energy utilization in data centers in other countries, policies for revitalizing waste heat energy utilization in Korean data centers were proposed. Furthermore, several ways to reduce the amount of power in the data center were explored and proposed.

Keywords : Data center, Waste heat energy utilization, Outdoor air conditioning, Renewable energy

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: sokheejung@gmail.com

Tel: 062-530-1857 Fax: 062-530-1859

#These authors are the co-first authors

© 2022, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

총 설

데이터 센터의 폐열 활용과 냉각 기술의 현재와 전망

박재량^{#1b} · 장호진^{#1b} · 최신혁^{#1b} · 정령^{#1b} · 정석희^{*1b}

전남대학교 환경에너지공학과 광주캠퍼스

요약: IT기술의 발달과 가상세계에 대한 수요 급증, 그리고 COVID-19의 유행함에 따라, 현재의 사회의 데이터 사용량은 유래가 없을 정도로 급증하고 있으며, 이를 처리하는 데이터 센터의 증설 필요성 또한 급증하고 있다. 데이터 센터는 쉴 새 없이 가동되며 운전이 있어 많은 전력을 소비한다. 전력의 소비가 늘어날수록 온실가스 배출 증가로 인해 환경에 악영향을 미치므로, 데이터 센터의 증가는 필연적으로 기후 환경에 영향을 미친다. 데이터 센터의 전력 사용량을 줄일 수 있는 대표적인 기술은 폐열 에너지 이용과 외기 공조이다. 본 총설에서는 두 가지 기술에 대한 주요 국가의 사례들을 분석하여 한국에게 유익한 기술 방향에 대해 검토하였다. 한국의 외기공조 기준이 완화됨에 따라, 한국에서 외기 공조 시설은 증가하는 추세이다. 하지만 폐열 에너지 이용에 대한 한국 정부의 실질적인 지원이 매우 제한적이다. 다른 나라의 데이터 센터의 폐열 에너지 회수에 대한 정책 사례를 분석하여, 한국 데이터 센터의 폐열 에너지 회수의 활성화를 위한 정책을 제안을 하였다. 더 나아가, 데이터 센터의 전력량을 줄일 수 있는 여러 방법을 모색하고 제안하였다.

주제어: 데이터 센터, 폐열 에너지 회수, 외기공조, 재생에너지

1. 서론

IT기술의 발달과 가상세계에 대한 수요 급증, 그리고 COVID-19의 유행함에 따라, 현재의 사회의 데이터 사용량은 유래가 없을 정도로 급증하고 있다. 데이터 센터의 증가는 에너지 소비의 증가로 이어지므로, 기후 변화와 에너지 문제와도 연관되어 있다.¹⁻⁸⁾ 더불어 2022년 10월 데이터 센터 화재 사건으로 데이터 센터에 대한 관심이 급증하고 있다.

데이터 센터는 정보통신 인프라에서의 매우 중요한 부분을 차지한다. 21세기 들어 데이터 송수신 및 저장 수요가 높아지고 가상 공간에 대한 수요도 증가함에 따라, 데이터 센터 수는 급격히 증가하고 있으며, 그에 따라 저장 용량 또한 급격히 증가하고 있다(Fig. 1). 국내 데이터 센터의 수는 2020년 기준으로 156개까지 증가한 데이터 센터는 매년 5.9% 증가해 세 배 이상 늘어났다. 특히, 2015년부터 2020년까지는 연평균 10.9% 성장했으며 오는 2025년까지는 연 평균 약 15.9% 정도 성장할 것으로 예상된다. 데이터 센터의 저장 용량은 같은 경우에는 2000~2014년 사이에 연 평균 성장률은 12% 수준이었으나 2014~2020년의 연 평균 성장률은 15%로 점점 가속화되고있으며, 그로 인해 전력소비량도 증가하였다.⁹⁾

데이터 센터는 IT기기에 운영에 소비전력과 데이터 센터 내 기기의 냉각에 사용되는 소비전력으로 크게 나눌 수 있다. 데

이터 센터가 전기를 정확히 어느정도 소비하는지는 연구자에 따라 다양하다. 대표적인 예로, 2018년 기준 전세계적으로 데이터 센터가 소비한 전력량에 대한 추정치는 205TWh부터 400TWh까지 다양하다. 이는 세계전력소비량의 1-2%를 차지한다.¹⁰⁾ 데이터 센터의 에너지 소비 예측은 연구 그룹마다 차이가 있는데, 현재와 같은 속도라면 2030년이 되면 2019년에 비해 데이터 센터 에너지 소비는 2배로 증가할 것이라고 예측한 보고가 있다.¹¹⁾ 또 다른 연구 그룹은 2015년에는 2030년 데이터 센터의 예상 에너지 사용량을 914 TWh라고 예측하였지만, 4년 후의 논문에서는 2,967 TWh로 수정했다.¹²⁾ 현재와 같은 기술 성장 국면에서 데이터 센터 에너지 수요가 2016년 286 TWh에서 2030년 321 TWh까지 성장할 것이라 예측하였고, 무어의 법칙(Moore's Law)의 종말과 산업용 IoT가 증가할 시 753 TWh까지 성장할 것이라 예측한 연구도 있다.¹³⁾

아일랜드는 글로벌 IT 기업들이 데이터 센터의 입지로 선호하는 국가이다. 저렴한 전기료와 국가의 제도적 지원, 그리고 높은 냉방 효율 때문이다. 하지만 아일랜드 내에서도 데이터 센터 건립에 따른 에너지 문제가 사회적 이슈가 되고 있다. 아일랜드의 국영 송전 회사는 아일랜드에서 전력 수요량 증가로 인해 앞으로 5년간 겨울마다 전력난을 겪을 수 있다고 경고했다. 아일랜드 Commission for Energy Regulation 대표 는 데이터 센터의 전력 요구량 증가가 매우 증가하고 있으며

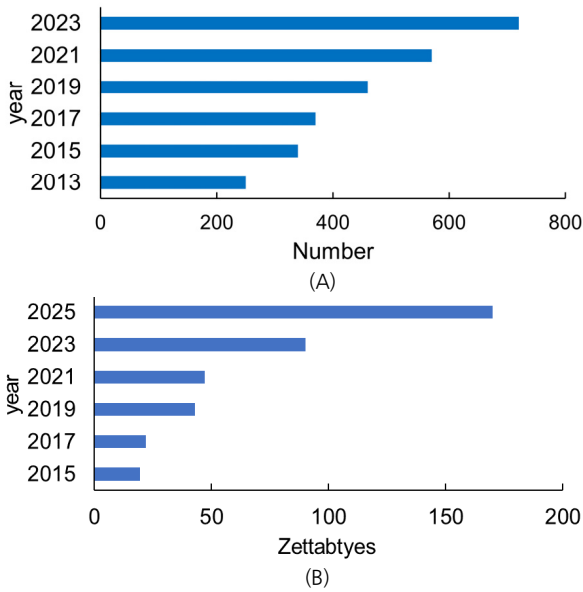


Fig. 1. Global data center demand (A) and data center capacity (B).⁹⁾

전력난에 큰 우려가 될 것임을 표명한 바 있다. 이에 아일랜드의 한 정당은 데이터 센터와 화석 연료와 연관된 시설의 신규 건립을 금지하는 법안을 발의한 바 있는데, 이는 글로벌 IT 기업 유치에 악영향을 끼칠 수 있는 사안이므로 아일랜드 사회에서 논란이 되고 있다.¹⁴⁾

데이터 센터는 쉴 새 없이 가동되며 운전이 있어 많은 전력을 소비한다. 전력의 소비가 늘어날수록 온실가스 배출 증가로 인해 환경에 악영향을 미치므로, 데이터 센터의 증가는 필연적으로 에너지 과소비와 나아가 기후 환경에 영향을 미친다. 기후변화위기와 에너지 위기를 막기 위해 대체 에너지의 개발이나 탄소 저감 기술 개발도 중요하다.¹⁵⁻²⁰⁾ 하지만, 각 섹터의 특성에 맞는 대책이 필요하다.

데이터 센터의 에너지 효율성을 나타내는 지표로 PUE(Power Usage Effectiveness, 전력 사용 효율성)가 있다. The Green Grid라는 단체에서 개발된 지표이다. 2006년 도입되기 시작했으며 2016년 국제표준화기구 및 국제전기기술위원회(ISO/IEC) 표준으로 지정되었다.^{21,22)} PUE는 데이터 센터에서 소비하는 전체 에너지 양을 컴퓨팅 장비에 전달되는 에너지의 양으로 나눈 값이다.

데이터 센터의 에너지효율화를 위한 다양한 방식이 존재한다. 데이터 센터에서는 효율적인 냉각과 폐열 에너지 회수를 통한 에너지 효율화가 진행되고 있다. 데이터 센터에서 방출되는 에너지로 인해 가열되는 것을 막기 위해 효율적인 냉각 기술이 필요하지만, 폐열을 다른 용도로도 활용할 수 있다. 폐열에서 에너지를 회수하거나 지역 난방을 위해 활용될 수도 있다. 외기공조방식은 데이터 센터의 냉각비용을 효과적으로 줄일 수 있는 대안이다.²³⁾

본 총설에서는 데이터 센터의 폐열의 이용 기술과 외기공조

기술에 대한 주요 선진 국가의 사례들을 분석하여 한국에게 유의미한 기술의 방향에 대해 검토하였다. 나아가 데이터 센터의 에너지 효율화에 대한 방안을 제시하였다.²⁴⁾

2. 본론

2.1. 폐열

2.1.1. 폐열 활용 사례

2.1.1.1. SH 공사 & KT

두 회사 간에 데이터 센터에서 발생하는 폐열을 지역 난방과 연관 지어 사업을 진행한 전례가 있다. 데이터 센터의 폐열을 지역 난방의 온수로 제공하는 것이었다. 이를 위해 데이터 센터의 냉각 설비를 히트펌프로 교환하고, 폐열 에너지를 지역 난방 네트워크와 연결하는 방식이었다. 하지만 양쪽 간 이견차로 현재 답보 상태에 있다. 폐열을 판매하는 측에서는 폐열 회수를 위한 투자비 및 운영비 및 내부수익률을 고려해 폐열 판매단가를 정했을 것이고, 구입하는 측은 외곽 수열의 품질과 외곽 수열 구매로 인해 생성되는 열병합발전의 가동률이 저하되는 문제 등을 고려해 폐열의 단가를 제시한 것으로 파악된다.¹²⁾ 폐열의 발매단가를 두고 양쪽의 입장 차이가 컸던 것으로 생각된다. 이러한 문제는 새로운 소비자의 확보가 없는 상태에서 데이터 센터의 폐열이 기존에 있던 지역 난방 열원을 대체했을 때 발생하는 문제인 것이다.

이 사업에서 공급 가능한 폐열 양은 연간 약 68,300 Gcal로 산정하고 있다. 폐열을 이용하기 위해 기존의 냉각기를 히트펌프로 교환함으로써 전력소비는 10,158 MWh (21,600 Gcal) 만큼 증가하게 된다. 이 증가분을 공급량에서 빼면, 데이터 센터 폐열 활용을 통해 46,700 Gcal의 에너지를 얻을 수 있다. 2017년을 기준으로 한 가구 당 지역 난방 평균 사용량은 6.95 Gcal 인 점을 참고하면, 이 폐열 에너지를 통해 6,700여 가구에 난방을 제공할 수 있다. 결국, 40 MW 규모의 데이터 센터에서 발생하는 폐열로 6,700여 가구에 난방을 제공할 수 있는 것이다.¹²⁾

현재 국내에서 면적이 500m² 이상이 되는 데이터 센터의 규모는 430 MW 정도로 약 7만 2천 가구가 이용할 수 있는 폐열이 생성되는 것으로 볼 수 있다. 2021년까지 증설이나 신설이 되는 데이터 센터를 고려할 경우 폐열 에너지는 93만 Gcal로 추정된다. 이는 약 14만 가구의 지역 난방 수요를 처리할 수 있는 양이다. 이는 2017년 기준으로 지역 난방이 제공되는 세대수가 280만 가구임을 참고할 때 5%에 불과한 양이다. 하지만 현재 국내 지역 난방의 열 생산에서 산업 폐열이 차지하는 비중은 0.6%, 양으로서는 48만 Gcal 정도이다. 고로, 2021년 예측되는 데이터 센터 폐열 잠재량은 이것의 약 2배 정도가 됨을 알 수가 있다. 또한 앞에서 살펴본 바와 같이 이후에도 데이터 센터의 증가와 이에 따른 전력소비 증가 흐름이 유지됨에 따라 생성되는 폐열의 사용 잠재량도 빠르게 상

승할 것으로 예측된다.¹²⁾

2.1.1.2. 폐열을 활용하는 해외 국가

데이터 센터에서 발생하는 폐열은 이미 해외 국가에서 활발하게 활용되고 있다.¹²⁾ 지역 난방이 보급된 유럽에서 폐열 활용은 다양하게 이용되고 있다. 핀란드, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이 등 북유럽 국가들이 폐열을 활용하는 대표적인 국가이다. 북유럽 국가들은 지역 난방 시스템이 활성화되어 있고 확대 시행을 하는 추세이다. 주거용 지역 난방 보급률을 살펴보면, 덴마크는 64%, 스웨덴 51%, 핀란드는 36% 수준이다. 노르웨이의 경우 지역 난방이 3.4%로 상대적으로 낮은 보급률을 보이지만, 산업용과 상업용을 포함한 지역 난방의 비중은 12% 정도이다. 미국은 2012년 기준 지역 난방 보급률이 6-10%로 북유럽과 비교해 비교적 낮은 편이지만 현재까지 꾸준히 증가하고 있다. 중국 북부 지역은 지역 난방이 난방 공급의 55%를 이루고 있다.

2.1.1.3. 미국의 폐열 활용 사례

미국에 있는 국립재생에너지연구소(NREL)의 에너지시스템통합시설(ESIF) 건물에는 고성능 데이터 센터가 있다. 이곳에서는 데이터 센터에서 발생하는 폐열을 회수하여 에너지를 재사용할 수 있도록 운영하고 있다. 데이터 센터에서 회수된 폐열 에너지는 열교환기를 통해 건물 내의 실험실과 사무실에 난방열을 공급한다. 데이터 센터에서 발생하는 폐열이 증가하면 연구소 내 건물 뿐만 아니라 캠퍼스에도 난방을 제공하는 것을 계획하고 있다.

데이터 센터에서 발생하는 폐열은 품질이 낮기 때문에 폐열을 회수하고 재사용하는 것은 어려운 과제이다. 이 폐열의 품질을 개선하기 위해서 분산 냉각 솔루션이 논의되었고, 품질을 더욱더 높이기 위해 열 펌프 기술이 사용되었다. 이 폐열 시스템은 중국 후허하오터(Hohhot)의 데이터 센터에서 구현된 바 있는데, 열 회수 시스템으로 데이터 센터에서 발생한 폐열은 데이터 센터 내 사무실의 난방 에너지로 활용되고 있다. 데이터 센터의 난방은 지역 난방 시스템을 통해 활용되고, 폐열은 저온수로 회수하여 히트펌프로 이동한다. 히트펌프를 통해 저 온수에서 54℃의 온수로 전환되어 지역 난방으로 이용하게 된다. 이러한 시스템을 통해 데이터 센터는 난방 연료 소비를 줄이고 전력 소비 또한 절약되었다.^{25,26)}

거대 클라우드 기업 아마존(Amazon)은 시애틀 시내에서 인근 데이터 센터 열을 재사용하는 프로젝트를 진행하고 있다. 아마존은 시애틀 중심가에 바이오 돔(Biodomes)이라고 부르는 캠퍼스 건물을 건설하는 계획을 추진하고 있다. 바이오 돔은 인근에 데이터 센터들이 운집해 있는 웨스턴 빌딩(Westin Building)의 데이터 센터에서 나오는 폐열을 난방 에너지로 재사용함으로써 가시성이 크게 높아졌다. 데이터 센터에서 폐열을 회수하는 시스템은 웨스턴 빌딩 지하 PVC 배관을 순환하는 물을 통해 데이터 센터의 열을 아마존 빌딩으로 전달한다. 물이 식으면

웨스턴 빌딩으로 반환되어 데이터 센터의 냉각을 돕는다. 이 과정에서 열회수냉각장치(heat-reclaiming chiller) 5개와 몇 개의 열교환기를 거치게 되며 온수의 온도는 18℃~54℃까지 상승해 바이오 돔의 난방시스템으로 최종 유입된다. 이 시스템은 새로운 에너지 생성보다는 버려지는 열을 재사용하기 때문에 친환경적으로 간주하고, 먼 거리의 발전소에서 옮겨지면서 에너지를 잃는 전기에 비해 효율적이다.^{25,26)}

2.1.1.4. 덴마크의 폐열 활용 사례

덴마크는 구글이나 페이스북, 애플과 같은 글로벌 IT기업들이 데이터 센터를 짓거나 운영하고 있다. 특히, 페이스북은 덴마크 오덴세(Odense)에 세 번째 데이터 센터를 건설했다. 이 데이터 센터에서 연간 총 165,000 MWh를 재활용해 약 11,000가구에 난방을 공급한다. 페이스북 데이터 센터는 냉각 장치 내부의 구리 코일을 통과하는 절연된 강철 파이프를 통해 데이터 센터 주변의 물을 순환시켜 시스템을 위한 열을 수집한다. 물은 낮은 온도의 열을 받아 덴마크 지역 난방회사 Fjernvarme Fyn의 히트펌프 시설로 흐른다. 그리고 Fjernvarme Fyn의 히트 펌프를 사용하여 물을 가정에서 사용할 수 있을 만큼 충분히 뜨거울 때까지 더 데운다.^{12,27-29)}

2.1.1.5. 스톡홀름의 폐열 활용 사례

스톡홀름은 2017년 Stockholm과 전력기업 Ellevio과 ICT 기업 Stockab이 파트너십을 맺고 Kista 지구에 데이터 파크를 설립했다. 데이터 파크에서 발생하는 데이터 센터 폐열은 Stockholm Exergy에 공급되며, 2018년에 추가로 데이터 파크를 건설해 발생하는 폐열을 지역 난방으로 사용하고 있다. 데이터 파크 사업에 참여하고 있는 기업은 DigiPlex, Interxion, Ericsson, Bohnhoff 등이 있다.^{12,30)} DigiPlex 사의 데이터 센터는 2018년 1만여 가구에 난방을 공급하기 위해 폐열 공급계약을 체결했다. 스톡홀름의 난방 수요 10%를 데이터 센터 폐열로 활용하기 위해 간접 공기 냉각 솔루션이 갖춰진 폐열 회수 프로그램을 시행할 계획이다.

Interxion 사의 데이터 센터는 열기를 식히기 위해 지역 난방을 공급받고 있다. 이때, 데이터 센터 난방에 사용된 24℃의 폐열은 다시 회수되어 히트펌프를 통해 가열되고 지역 난방 시스템에서 다시 재사용된다.

Ericsson 사도 데이터 센터 난방을 위해 Stockholm Exergy의 히트펌프 냉각 시설을 사용하고 있다. 데이터 센터에서 냉각에 사용 후 회수된 폐열은 지역 난방 시스템을 통해 스톡홀름 도시의 주택이나 건물 난방 등에 공급되는 순환을 겪는다.

Bohnhoff 사는 운영하는 데이터 센터에서 나오는 폐열을 Stockholm Exergy의 지역 난방 시스템에 공급한다. 데이터 센터 냉각 후 회수되는 폐열은 보통 68℃ 이상의 온도를 지니며, 폐열이 지역 난방을 위해 공급되는 외기 온도는 주로 7℃ 미만일 때 이루어진다.

북유럽 데이터 센터 회사인 DigiPlex는 2019년 노르웨이 오슬로 인근에 두 개의 데이터 센터를 착공했다. 100% 재생 에너지로 구동되며, 데이터 센터에서 발생한 폐열을 지역 난방 시스템에 연결하여 지역 주민들에게 난방을 제공할 수 있도록 설계되었다.

2.1.2. 한국과 해외 데이터 센터 폐열 활용 비교

영국은 재생 열에너지에 보조금을 지원하는 RHI(Renewable Heat Incentive) 제도를 운영하고 있다. 데이터 센터의 폐열을 활용하는 경우에도 RHI 제도를 통해 인정받을 수 있다. 미활용 열에너지도 재생에너지로 인정하는 것이다.

그러나 우리나라의 경우 해수열을 제외한 미 활용 열에너지를 신재생에너지로 포함하고 있지 않다. 미활용 열에너지가 신재생에너지 분류에 포함되지 않아 데이터 센터의 폐열을 활용하는 것은 신재생에너지 지원 제도에서 제외된다.

미국은 연방 정부에서 에너지 효율적 상업 건물에 대한 법인세 감면과 주(State) 정부 차원에서 히트 펌프 지원 제도 등 에너지효율 리베이트 프로그램을 운영하고 있다. 덴마크의 경우 화석 연료의 사용을 줄이고 에너지효율을 높이기 위해서 히트펌프 역할을 중요하게 생각해 히트 펌프 지원 제도를 펼치고 잉여 열의 활용도를 높이려는 정책이 진행되고 있다. 이미 유럽 국가들은 공기 열이나 수열을 활용하는 히트펌프 기술을 재생에너지로 간주해 인센티브 제도를 시행하고 있다. 우리나라에서는 히트펌프 보급 및 확산에 대한 정책이나 제도적 지원이 해외 국가보다 미비한 만큼 이에 대한 적절한 해결책 마련이 필요한 것으로 보인다.¹²⁾

2.2. 외기공조

2.2.1. 외기공조 활용사례

2.2.1.1. 네이버의 외기공조 활용사례

네이버 데이터 센터 ‘각’은 춘천시에 위치해 있다. 춘천시는 1년 평균 온도가 11.1℃, 여름철 평균 온도는 25℃ 이하이다. 네이버에 따르면 연중 약 90% 기간 동안 외기 냉방이 가능하며, 동절기에는 별도 장치 필요없이 100% 외기로만 냉방이 가능하다고 밝혔다.

네이버는 AMU(Air Misting Unit) 장치를 활용한다. AMU에서 외기에 미세한 물입자를 분사하여 외기 온도를 낮춰 냉방에 이용하는 것이다. 이를 이용해 봄, 가을에는 냉동기 가동을 하지 않고 AMU를 이용해 냉방을 하고, 겨울에는 외기와 재이용 공기를 섞어 적절한 온도와 습도를 유지한다.

데이터 센터 ‘각’은 불어오는 바람과 닿는 면적을 최대한 넓히고 공기의 흐름이 원활히 되도록 건물을 V자 형태로 되어 있으며 넓은 동 사이 간격을 두었다. 이를 통해, PUE 1.09를 달성하였다. 이상적인 PUE는 1로서, 이는 데이터 센터에 유입되는 모든 에너지가 오로지 데이터 센터 장비의 운영에만 쓰이는 이상적인 조건으로서, 1.09는 데이터 센터의 전력 사

용 효율성이 매우 높음을 나타낸다.

2.2.1.2. LG의 외기공조 활용사례

LG CNS는 ‘빌트 업(Built-Up) 외기 냉방 시스템’을 구축하였다. 이 시스템의 운전방식은 3가지 모드로 구분할 수 있다. 우선 전 외기 모드는 외기 온도가 13℃에서 20℃인 경우 냉동기 운영을 중단하고 전체 외기를 공급한다. 다음으로 혼합 모드는 외기온도가 13℃ 이하 및 영하일 경우, 외기온도가 너무 낮으므로 데이터 센터 내부의 공기와 혼합 시켜 적절한 온도의 공기를 공급하는 방식이다. 마지막으로 순환 모드는 외기 온도가 20℃ 이상인 경우 외기공조가 불가능하므로 외기를 차단하고 냉동기를 운영하는 방식이다.

이는 페이스북 외기공조와 원리가 비슷하지만, 국내에서 최초로 외기공조 가동 기간을 연중 8개월까지 연장한 시스템이다. ‘Built-Up 외기 냉방 시스템’은 PUE가 1.39이다.³¹⁾

2.2.1.3. 페이스북의 외기공조 활용사례

페이스북은 현재 전 세계적으로 영향력이 가장 많은 소셜 네트워크 서비스이다. 세계 전역에 여러 개의 자사의 전용 데이터 센터를 운영하고 있기 때문에 이러한 서비스가 가능하다. 미국의 경제 매체인 비즈니스위크는 하루에 3억5000만 개의 사진과 영상이 올라오고, 백억 건의 메시지를 관리하기 위해 노스캐롤라이나와 오레곤주, 스웨덴 등에 건립된 데이터 센터 관리비용이 10억달러를 넘는다고 추정했다. 이런 과도한 에너지 소비에 대해 페이스북은 미리 인지하였고, 여러 가지의 솔루션을 자체적으로 연구, 적용하고 검증하는 작업을 꾸준히 수행해 왔다.

2011년 4월 페이스북은, 자신들의 최첨단 데이터 센터 요소 기술을 공개하였는데 에너지 저감을 위해 자체적으로 주문 제작한 서버 냉각 기술, 전력 전기 시스템 및 운영 조건 등의 포괄적인 에너지 절약 데이터 센터 기술을 오레곤 데이터 센터의 구축 사례를 들어 소개한 바 있다.

페이스북의 최첨단 그린 데이터 센터인 노스캐롤라이나 포레스트 시티 데이터 센터는 오레곤 데이터 센터보다 더욱 개선된 시스템이 적용되었다. 포레스트 시티 데이터 센터는 더욱 친환경적이고 신재생 및 에너지 효율을 세계 최고 수준으로 끌어올렸다.

페이스북의 데이터 센터는 에너지소비량의 약 절반을 차지하는 서버 냉각 에너지를 줄이기 위해 기본적으로 외부공기를 공조 및 냉각에 이용하는 시스템을 활용하고 있으며, 그것을 건물과 일체화 하였다. 오레곤 데이터 센터와 같이 기후조건이 유리한 지역의 데이터 센터는 냉동기를 설치할 필요가 없으나, 포레스트 시티의 기후 특성 때문에 직행식(DX) 보조 냉동기를 설치하였다. 그러나 포레스트 시티 데이터 센터는 일반적인 데이터 센터 환경조건(ASHRAE)에 비해 상당히 완화된 실내 조건을 적용하기 때문에 외기를 이용한 서버 냉각

의 기간이 증가하여 보조 냉동기를 사용한 적이 없다.

일반적인 데이터 센터는 24시간 365일 냉동기, 냉각 탑 및 항온항습기(CRAC)를 운영해서 서버의 발열을 제거하는 반면, 페이스북 데이터 센터는 연중 외부공기를 서버 룸으로 공급해서 서버의 발열을 제거하는 제어시스템을 구축하고 있다.^{10,32,33)}

2.2.1.4. HP의 외기공조 활용 사례

Wynyard에 위치한 HP Data Center는 기존 3만 평방미터 규모의 창고 건물을 데이터 센터 시설로 만든 것이다. 이 프로젝트는 표준 기계 설계 방식에서 벗어나 수동 냉각 솔루션을 통합하여 품질과 신뢰성을 유지하면서 최첨단 데이터 센터를 지원하기 위한 목적으로 수행되었다.

혁신적인 무 압력 냉각 솔루션 개발의 성공을 통해 데이터 센터에 있는 서버를 시원하게 유지하기 위해 기존의 냉동 인 프라 대신 시원하고 신선한 공기를 광범위하게 사용한다. 낮은 주변 온도를 유지함으로써 서버는 더 빠르고 효율적으로 작동하여 성능을 향상시키고 고객의 비용을 절감할 수 있다. 이 시스템은 연중 대부분 현지 기후에서 사전 유지되는 낮은 외부 온도의 이점을 제공하며, 최대 주변 조건에서 보조 냉각이 이루어진다.

Wynard HP Data Center는 전산실 하부 플레넘 높이를 3.6 m로 해서 정압을 낮춰 낮은 회전수를 갖는 팬으로도 냉각을 가능하게 하여 팬 동력을 절감할 수 있게 설계되었다. 직접 공기 냉각을 사용하려면 데이터 홀을 드나드는 저속으로 대량의 공기가 필요하다. 이를 용이하게 하기 위해, 데이터 홀의 설계에는 에어 플레넘과 함께 새롭게 솟아오른 구조 바닥이 포함되어 있으며, 이 바닥 아래에 위치한 기계 설계의 핵심 부분을 형성하고 있다.

환기 시스템은 유입되는 공기를 급기 플레넘으로 공급한다. 이 설계는 따뜻한 귀환 공기, 냉각 및 제습기를 혼합하여 필요한 급기 조건을 만들 수 있는 기능을 통해 이 공기 흐름의 100%를 외부 신선한 공기로부터 끌어낼 수 있게 한다. 이 시스템을 적용함으로써 HP는 연간 최대 416만 달러의 전력을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.^{10,33)}

2.2.1.5. Sakura Internet의 외기공조 활용 사례

Sakura Internet Data Center는 도쿄, 오사카, 홋카이도(이시카리) 세 지역에 지어져 있다. 그 중 이시카리 데이터 센터는 클라우드 컴퓨팅에 최적화된 일본 최대 교외 데이터 센터 중 하나이다. 홋카이도의 시원한 공기를 이용한 노천 냉각 시스템이 에너지 효율을 높이고, 건물부터 장비에 이르기까지 모든 곳에 적용된 모듈식 설계에 따른 유연성, 도쿄 돔의 1.1배에 달하는 거대한 크기에 따른 규모의 경제성을 갖추고 있다.

실외 냉각 시스템은 거의 연중 이시카리 데이터 센터의 서버 룸에서 사용할 수 있다. 홋카이도의 시원한 공기를 서버

룸으로 들어오는 '직접 노천 냉각 방식'을 사용하고, 일반 도시형 데이터 센터 대비 전력소비가 약 40% 절감된다. 이는 세계 최고 수준의 에너지 효율을 보여준다.

이 센터는 현재 세 가지 종류의 에어컨 시스템을 사용하고 있다. 하나는 서버 실 천장에서 외부 공기를 불어넣어 서버를 냉각시키는 '천장 환기 시스템'이다. 두 번째는 측면에 설치된 거대한 선풍기를 이용해 벽에서 외부 공기를 실내로 불어넣는 '벽면 환기 시스템'이다. 서버의 폐열은 천장을 통해 외부로 배출된다. 세 번째는 랙 열 사이의 통로에 있는 칸막이를 이용하여 서버에 공급되는 냉기와 서버에서 나오는 뜨거운 공기를 물리적으로 분리하는 "온 통로 봉쇄 시스템"이다.

홋카이도의 시원한 외부 공기를 사용하여 냉각 시스템 가동 시간을 기존 데이터 센터의 10분의 1 이하로 줄여 데이터 센터 에너지 효율 등급 PUE 1.0X를 달성할 수 있었다(Fig. 2).

위 기업들 이외에도 해외의 기업들은 외기 냉방 시스템을 적극 활용하고 있고, 이 데이터 센터들은 지리적으로 한랭지역에 위치해 있다. 외부 공기를 최대한 많이 이용할 수 있는 제어 운전을 통해 PUE를 1.25 이하로 유지하고 있다.

외기를 활용하는 모든 데이터 센터들이 데이터 센터 환경조건(ASHRAE) guideline을 충족하는 조건을 적용하고 있고, 냉복도(Cold aisle), 온 복도(Hot aisle)를 구분하는 컨테인먼트(containment)를 적용하는 것으로 나타났다. 앞서 언급했던 Facebook, Wynyard HP Data Center, Sakura Internet Data Center을 포함한 5개의 대표적인 해외 기업들의 데이터 센터의 외기 냉방 적용 사례 및 적용기술 분석에 관한 내용을 Table 1로 정리하였다.^{10,33)}

2.2.2. 한국과 해외 사례 비교

국내 데이터 센터와 해외 데이터 센터들의 가장 큰 차이점은 지리적인 위치에 따른 기후 차이이다. 해외 대부분의 데이터 센터들은 평균 기온이 외기 공조 실내 제한 조건에 부합한 한랭 지역에 위치해 있는 반면, 국내 데이터 센터들은 이 점에

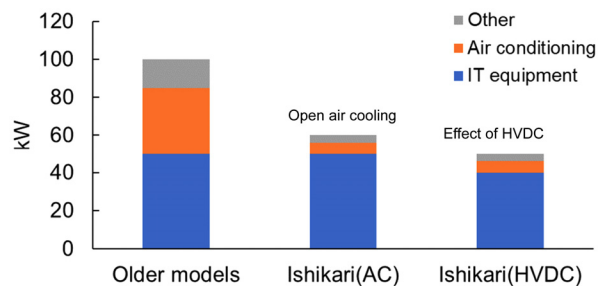


Fig. 2. Electricity consumption reduction in Sakura Internet data center using outside air conditioning.

Table 1. PUE comparisons in data centers.²³⁾

Facebook	Sakura Internet	HP	Google	Microsoft	LG CNS
1.07	1.11	1.20	1.22	1.25	1.39

Table 2. The basic difference between a typical data center and a Facebook data center.²⁷⁾

Sortation	Typical Data Centers	Facebook Data Centers
Electrical power system	- 480V → 208V(power loss: 21%) - Center UPS system	- 480V, 208V(power loss: 7.5%) - Remove central UPS system. - 48VDC UPS System Construction.
Extinguish system	- Gas meter	- Water system
IT server room type/structure	- Cold/Hot Aisle Sortation - Open Architecture Form - Re-circulation and By-pass Occurrence	- Cold/Hot Aisle Sortation - Hot Aisle Containment - Re-circulation and By-pass prevent
Indoor settling conditions	- Temperature: 18~27°C - Humidity: 50~55%	- Temperature: 18~30°C - Humidity: 20~80%

대해 지리적인 한계가 있다. 최근 데이터 센터의 실내온도, 습도 조건이 완화되면서 국내에서도 외기 공조를 이용한 데이터 센터 에너지 절감을 할 수 있는 조건이 점차 갖춰지면서 춘천 등 연평균 기온이 낮은 북쪽 지역에서 데이터 센터가 많이 생겨나는 추세이다.

일반적인 데이터 센터와 전세계 데이터 센터 중 PUE가 가장 낮은 페이스북 데이터 센터의 차이점에 대해서 알아보자. 일반적인 데이터 센터들은 연중 24시간 365일 냉동기/냉각탑 및 온·환 습기를 가동하여 IT서버의 발열을 제거하는 반면, 페이스북의 데이터 센터는 연중 외기를 서버 룸으로 공급하여 IT서버의 발열을 제거하는 설비와 제어시스템을 구축하였고 건물과 일체화를 하였다. 일반적인 데이터 센터는 변압과정에서 전력손실이 21%이지만, 페이스북의 데이터 센터는 전력손실을 7.5%까지 줄였다. 나아가 유지해 줘야할 온도와 습도의 폭을 대폭 완화하여 데이터 센터의 가동을 더욱 쉽게 할 수 있도록 시스템을 구축하였다.^{10,32,34)}(Table 2).

2.3. 폐열과 외기공조 경제성평가

2.3.1. 냉방 시스템 성능 분석

데이터 센터의 서버 룸 연면적을 2100 m² 버점유면적을 576 m², 서버룸 냉방 목표온도를 24°C로 설정하여, 각 열원별 성능에 따른 데이터 센터의 월 전체 사용량을 검토한 자료가 있다.³⁵⁾ 냉각탑과 외기 냉방의 경우에는 실외 공기온도의 영향으로 인해 동계에서 하계로 나아갈수록 사용 증가율이 높지만, 지열 히트펌프의 경우 다른 두 열원과는 다르게 실외 공기온도의 영향을 받지 않아 동계에 비해 하계의 사용량 증가율이 낮게 나타났다(Table 3).

외기 냉방은 냉각탑에 비해 월 전체 사용량이 10% 내외 차이로 연중 비슷한 수치를 보였다. 지열 히트펌프의 경우 외기

냉방과 비교했을 때 최저 0.93%에서 최대 24.21%의 차이를 보였으며, 동계에는 외기 냉방이 낮은 실외 공기를 이용한 냉방 에너지 절감 효과로 인해 사용량 차이가 적었다. 지열 히트펌프와 냉각탑을 견주어 봤을 때 최저 11.32%, 최대 32.46% 정도의 성능 차이를 보였다.

평균적인 값을 비교했을 때, 지열 히트펌프, 외기 냉방, 냉각탑 순으로 좋은 성능을 보였다. 하계 월 전체 사용량이 다른 계절에 비해 높은 것을 고려해도, 지열 히트펌프를 이용하는 것이 냉방 에너지 절감 측면에서 뛰어난 열원 시스템이라고 판단된다.³⁵⁾

2.3.2. 폐열의 지역 난방 경제성 평가

기존 난방 및 데이터 센터 폐열을 활용한 지역 난방 비용을 생애주기 비용 분석 기법에 따라 산정하여 회수기간법으로 경제성을 비교하고, 시나리오별 에너지 사용에 따른 온실가스 배출량을 비교하는 연구의 결과가 있다(Fig. 3).³⁶⁾ 시나리오 1은 지역에서 기존의 난방시스템을 사용하는 것이고, 시나리오 2는 회수된 폐열을 지역 난방의 형태로 공급하는 경우이다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 데이터 센터의 폐열 회수를 통해 지역 난방으로 활용 시, 전기요금이 동결되었다고 가정할 경우 편익은 약 40억 원이며, 초기투자 비용 회수가 가능한 시점은 18년 경과 후로 나타났다.

(2) 에너지 요금이 인상된다고 가정할 경우, 약 300억원 에너지 절약 효과가 있다. 초기투자비 회수가 가능한 시점은 사업이 시작한 때로부터 10년 경과 후로 나타났다.

시나리오 (1), (2)의 두 경우 모두 투자비 회수는 가능하나, 에너지 비용이 인상될 경우, 그 시점이 8년 단축되는 것으로 나타났다.

(3) 비용/편익 분석 결과는 시나리오 (1)이 0.2로 비용 편익

Table 3. Seasonal average monthly usage for each heat source(kWh).³⁵⁾

	Spring	Summer	Fall	Winter	Average
Cooling Tower	104,865	133,805	108,609	90,826	109,626
Air-Conditioning	94,006	119,232	97,233	81,303	97,943
Geothermal Heat Pump	83,841	90,359	83,743	80,545	84,622

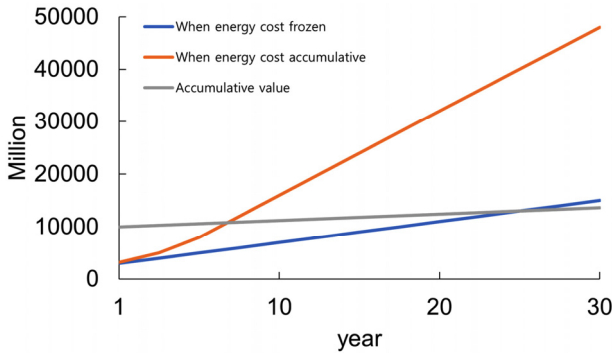


Fig. 3. Comparison of the initial payback period.³⁶⁾

비율을 충족하지 못하나, 시나리오 (2)는 1.7로 1.0을 상회하여 최소 비용편익비율을 충족하는 것으로 사료된다.

(4) 2006 IPCC Guideline을 활용하여 시나리오별 에너지 사용량에 한정하여 온실가스 배출량을 산정 결과, 시나리오 (1)은 14.9 tCO₂-eq, 시나리오 (2)는 0.006 tCO₂-eq로 나타났다.

시나리오 (1)대비 시나리오 (2)의 경우 99%이상의 온실가스 배출량 감소가 가능한 것을 확인하였다.

산업통상자원부에서 공고한 “제5차 집단에너지 공급 기본계획”에서 2023년까지 지역 난방을 2018년 대비 약 31% 증가한 총 408만호, 보급률 증가를 20.9%까지 전망하면서 효율적 에너지 활용을 고려한 실질적인 방안 검토가 필요할 것으로 판단된다.

초기 투자비 회수 시점이 최소 10년으로 산출되었는데, 지역 난방 사업 특성상 막대한 초기투자비가 소요되는 것을 감안할 때, 향후 수익성을 판단할 때는 정부의 보조금 비율에 따른 경제성 분석이나 에너지이용합리화법 제14조에 따른 금융-세제상의 지원 확대 논의가 필요하다.

에너지 요금인상될 경우 경제성 평가 측면에서도 데이터 센터 폐열 활용의 지역 난방을 위한 추가 설치비용 회수 시점이 단축될 수 있을 것이다. 따라서, 향후 비용 절감 요인 내지 법규와 제도 변화를 고찰하여 현실적인 경제성 평가가 필요하겠다. 아울러 온실가스 배출권 배분 및 거래에 관한 법률상 할당 대상 업체에 해당 데이터 센터의 경우 본 연구에서 제시한 데이터 센터 폐열의 지역 난방 활용을 대상으로 온실가스 감축방안 활용가능성 등을 검토하여 데이터 경제와 탄소중립 실현의 동조화에 기여할 수 있을 것이다.³⁶⁾

2.3.3. 외기공조 경제성 평가

국내 데이터 센터를 대상으로 기존에 있던 중앙 냉수 냉방 시스템 및 외기 도입 냉방시스템 도입에 따른 에너지 성능개선 효과를 검토와, 초기 투자비용과 운전 및 보수비용 등을 고려하는 LCC(Life cycle cost)분석을 통해서 데이터 센터의 외기 도입 냉방 시스템 도입에 따른 경제성을 검토한 자료가 있다 (Fig. 4).³⁷⁾ 냉방시스템의 생애주기 20년의 대안에 따른 연중 누적 비용과 손익분기점의을 계산한 것이다. 그 결과는 이와 같다.

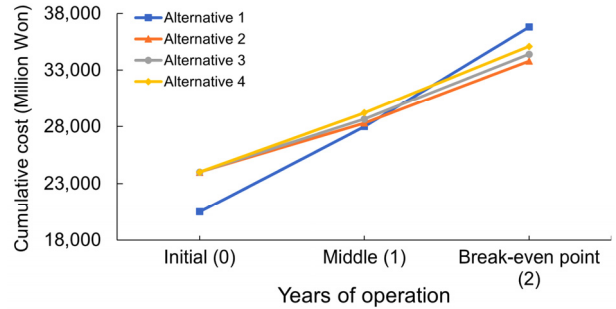


Fig. 4. Break-even point for cumulative cost of each alternative.³⁷⁾

(1) 외기의 사용률이 증가함에 따라 기존의 중앙 냉수 냉방 시스템에 대비해 최대 48%의 에너지 저감효과가 나타났으나, 실외 공기온도가 높은 하계에는 시스템 도입에 따른 저감효과를 기대하기는 어렵다.

(2) 외기 도입 냉방 시스템 사용시 필터의 MERV 등급이 높아질수록 집진 성능은 개선되나, 팬 동력 상승에 따른 필터 교체비용 및 전력사용 요금도 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 생애주기 20년 동안, 외기 도입 냉방시스템의 경우에는 초기투자 비용이 17% 증가하였으나 운전 비용이 큰 폭으로 보완됨에 따라 필터에 관계없이 2년 내에 손익분기점이 발생하는 것으로 나타났다.

또한 전력사용 요금에 대한 민감한 부분을 분석한 결과에서도 외기 도입 냉방시스템의 손익분기점의 변화폭은 크지 않은 것으로 나타나, 지역별 미세먼지를 고려해 고성능 필터를 적용할 경우에도 외기 도입 냉방 시스템 도입에 따른 경제성을 갖출 수 있을 것으로 판단된다.³⁷⁾

2.4. 해외 데이터 센터 정책

네덜란드는 2018년 디지털화로 창출된 사회적, 경제적 기회를 활용하여 유럽 전역에서 디지털 리더로 성장하기 위해 네덜란드 디지털화 전략을 발표하였다. 네덜란드는 재생 에너지 전력만이 아니라 UPS 시스템, 팬, 냉수 탑 및 데이터 센터의 에너지 효율을 높여주는 기타 하드웨어에 대해서 세금 혜택을 제공하고 있다. 그 중에서도 기업은 에너지 투자 수당이라고 불리는 EIA(Energy Investment Allowance) 프로그램을 통해서 투자 비용의 45% 이상을 면세 받을 수 있다. 기업이 에너지 절약 설비에 투자하거나 계속해서 사용할 수 있는 에너지를 사용하는 경우 지원 대상이 될 수 있다. 2021년 EIA 프로그램에 할당된 예산은 약 1억 7800만 달러이다. 또한, EID (Environment Investment Deduction, 환경 투자 공제) 프로그램을 통해서 환경친화적으로 건축된 데이터 센터 투자 비용의 최대 36%까지 도움을 받을 수 있다.³⁸⁾

3. 친환경적인 데이터 센터를 위한 제안

(1) 네덜란드의 경우 친환경적인 기술을 이용하여 데이터

센터를 건축하였을 때 세금공제혜택을 주거나 투자비용의 일부를 준다. 한국도 친환경적인 데이터 센터 건축을 위해 네덜란드의 정책과 같이 친환경적인 데이터 센터 구축에 대한 세제 혜택과 투자비용 지원을 할 필요가 있다.

(2) 현재 국내의 데이터 센터에서 발생하는 폐열은 2021년 까지 증설이나 신설이 되는 데이터 센터를 고려할 경우 폐열 에너지는 93만 Gcal로 추정된다. 약 14만 가구의 지역 난방 수요를 처리할 수 있는 양으로서, 현재 국내 지역 난방의 열 생산에서 산업 폐열 약 2배이다. 폐열 이용 기술은 기술적으로 높은 완성도를 가지고 있고, 위에 언급한 여러 기술 중 가장 효과적인 기술이다. 국가의 제도적인 지원을 통해 본 기술을 널리 확산할 필요가 있다.

(3) 한국에서는 하절기에는 더운 온도로 인해 외기 냉방이 불가능하다. 하지만 가을에서 겨울철로 갈수록 외기 냉방이 가능한 시간이 늘어난다. 연간 8,760 시간 중 5,480시간 동안 외기 냉방이 가능하다. 외기 냉방 시스템은 외기 냉방이 불가능한 냉동기 운전시스템과 비교했을 때 연간 약 50%의 전력 에너지를 절감하는 효과를 얻었다. 외기 냉방을 최대한 늘릴 수 있는 입지 선정과 데이터 건축 디자인을 통해 외기 냉방의 효과를 늘려야 한다.

(4) 서버의 전력 소모를 줄이기 위해 CPU의 속도를 동적으로 제어해줄 수 있는 동적 전압 주파수 조절 기술(DVFS: Dynamic Voltage Frequency Scaling), 서버의 수를 줄일 수 있는 서버 가상화(Virtualization) 기술들이 개발 되어 적용되고 있다. 현재 소프트웨어적 접근법이 유용한 이유는 데이터 센터의 평균 CPU 활용률은 12.5%에 불과하여, 이를 86%까지 증가시킬 경우 전력 사용량을 75%까지 절감할 수 있다고 한다. 이와 같이 소프트웨어적 접근 방법은 새로 생겨나는 데이터 센터 뿐만 아니라 기존에 있는 데이터 센터에도 적용할 수 있다는 점에서 유용한 접근법이므로 기술적 발전과 제도적 지원을 통해 폭넓게 적용할 필요가 있다.

(5) 하지만 위에 언급한 소프트웨어적인 기술의 적용이 활발히 이루어지지 않고 있다. 데이터 센터의 목적이 안정적인 IT 서비스 제공에 초점을 맞추고 있어 에너지 절감 기술을 적용하였을 때 시스템 안정성과 보안 문제에 대한 우려가 있다. 최근에는 구글에서 알파고를 만든 딥마인드 AI를 사용하여 데이터 센터의 냉각 비용을 40% 절감하는 등 소프트웨어적 접근법이 적용되기 시작되고 있다. 시스템의 안정성과 보안 문제 또한 기술적으로 검증될 필요가 있겠다.

(6) Pareto의 원리에 따르면 IT사용률은 초기 설계 단계에서 대처해야 하며 에너지 손실을 줄이고 기기의 에너지 효율을 개선하는데 중요하다. 초기 건축 설계와 초기 운영 설계에 있어 데이터 센터의 에너지 효율과 달성되도록 국가의 기술 발전과 정책 지원이 필요하겠다.^{39,40)}

(7) 삼성전자에서 자사가 개발한 저전력 램을 탑재할 경우에는 연간 7TWh의 전력을 절감할 수 있다고 발표하였다.

2019년 말 폐쇄하기로 결정된 노후된 화력발전소 보령 1, 2호기의 발전량이 각각 2.6TWh인 점을 감안하면, 메모리반도체 기술로 매년 노후한 화력발전소 2.5기에 달하는 전력을 절감할 수 있는 것이다.⁹⁾ 이처럼 새로운 기술의 개발과 적용이 데이터 센터 에너지 효율과에 있어서도 중요하다.

(8) 마이크로소프트는 '네이틱 프로젝트'를 진행하였고 2015년에 3m길이의 데이터 센터를 캘리포니아 앞바다에 105일간 넣고 검사하고 증명하는 1단계 임무를 달성하면서 수중 데이터 센터가 가능성을 입증했다. 곧이어 2018년 2단계를 검증 하기 위해 864대의 서버와 냉각 시스템, 27.6페타바이트(PB) 용량의 저장장치 등을 부착한 12m 길이의 데이터 센터 '네이틱 노던아일'을 스코틀랜드 오크니섬 인근 36.5m 깊이의 바닷속에 넣었다. 이후 2년간 데이터 센터 안정성과 성능을 입증하고 올해 7월 이를 다시 거두어들였다. 분석 결과 지상 데이터 센터의 반해 해저 데이터 센터의 고장률이 8분의 1로 나타났다. 연구팀은 해저 데이터 센터가 질소로 속을 채워 장비를 부패 시키는 습도와 산소로부터 자유롭고 장비 고장의 변수인 사람의 잦은 이동과 온도 변화 등도 발생하지 않아 이 같은 결과를 얻었다고 말했다.

Acknowledgement

이 연구는 대한민국 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2021R1A2C1013989).

Reference

1. B. Koo, S. P. Jung, Trends and perspectives of microbial electrolysis cell technology for ultimate green hydrogen production, J. Korean Soc. Environ. Eng., 44(10), 383-396 (2022).
2. N. Savla, S. Pandit, N. Khanna, A. S. Mathuriya, S. P. Jung, Microbially powered electrochemical systems coupled with membrane-based technology for sustainable desalination and efficient wastewater treatment, J. Korean Soc. Environ. Eng., 42(7), 360-380(2020).
3. S. Son, Y. Kim, M. W. Kim, S. P. Jung, Recent trends and prospects of microbial fuel cell technology for energy positive wastewater treatment plants treating organic waste resources, J. Korean Soc. Environ. Eng., 43(10), 623-653(2021).
4. H. Chai, Y. Choi, M. Kim, Y. Kim, S. P. Jung, Trends of microbial electrochemical technologies for nitrogen removal in wastewater treatment, Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 34(5), 345-356(2020).
5. S. Park, W. Kim, M. Kim, Y. Kim, S. P. Jung, Trend of treatment and management of solar panel waste, Journal of Korea Society of Waste Management 38(3), 200-213(2021).
6. A. Amrut Pawar, A. Karthic, S. Lee, S. Pandit, S. P. Jung, Microbial electrolysis cells for electromethanogenesis: materials,

- configurations and operations, *Environmental Engineering Research*, 27(1), 200484(2022).
7. S. Pandit, N. Savla, J. M. Sonawane, A. M. D. Sani, P. K. Gupta, A. S. Mathuriya, A. K. Rai, D. A. Jadhav, S. P. Jung, R. Prasad, Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: recent advances, *fermentation*, 7(3), 169(2021).
 8. S. Pandit, N. Savla, S. P. Jung, Recent advancements in scaling up microbial fuel cells, *Integrated microbial fuel cells for wastewater treatment*, 349-368(2020).
 9. J. H. Sim, Samsung brings ip its eco-friendly semiconductor vision, <https://news.naver.com/main/read.naver?oid=008&aid=0004447113>, (2020).
 10. T. H. Jang, Consideration of outdoor air cooling in the data center, *Korea institute of science and technology information*, (2014).
 11. A. Stephens, C. Tremlett-Williams, L. Fitzpatrick, L. Acerini, M. Anderson, N. Crabbendam, Carbon impact of video streaming, *The Carbon Trust*, 1-101(2021).
 12. S. S. Oh, A case study on the application of waste heat in the data center and its policy implications, *Research report of the institute of energy economics*, 1-96(2019).
 13. C. Longbottom, Free-air cooling - using natural cooling in the data centre, <https://www.computerweekly.com/tip/Free-air-cooling-using-natural-cooling-in-the-data-centre>, (2011).
 14. E. GROUP, Annual report 2018, <https://www.eirgridgroup.com/annual-report-2018/>, (2018).
 15. M. Zahid, N. Savla, S. Pandit, V. K. Thakur, S. P. Jung, P. K. Gupta, R. Prasad, E. Marsili, Microbial desalination cell: desalination through conserving energy, *Desalination*, 521, 115381(2022).
 16. H. V. H. Tran, E. Kim, S. P. Jung, Anode biofilm maturation time, stable cell performance time, and time-course electrochemistry in a single-chamber microbial fuel cell with a brush-anode, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 106, 269-278(2022).
 17. S. Lee, S. M. Yeon, S. P. Jung, Evaluation of accelerated mineral carbonation efficiency using industrial by-products and estimation of its domestic carbon dioxide reduction potential, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 44(1), 21-30(2022).
 18. B. Koo, S. P. Jung, Improvement of air cathode performance in microbial fuel cells by using catalysts made by binding metal-organic framework and activated carbon through ultrasonication and solution precipitation, *Chemical Engineering Journal*, 424, 130388(2021).
 19. M. Quraishi, K. Wani, S. Pandit, P.K. Gupta, A. K. Rai, D. Lahiri, D. A. Jadhav, R. R. Ray, S. P. Jung, V. K. Thakur, R. Prasad, Valorisation of CO₂ into value-added products via microbial electrosynthesis (mes) and electro-fermentation technology, *fermentation*, 7(4), 291(2021).
 20. B. Koo, S. M. Lee, S. E. Oh, E. J. Kim, Y. Hwang, D. Seo, J. Y. Kim, Y. H. Kahng, Y. W. Lee, S. Y. Chung, S. J. Kim, J. H. Park, S. P. Jung, Addition of reduced graphene oxide to an activated-carbon cathode increases electrical power generation of a microbial fuel cell by enhancing cathodic performance, *Electrochimica acta*, 297, 613-622(2019).
 21. Naver Datacenter Gak Home Page, <https://datacenter.navercorp.com/tech/gak-chuncheon.>, (2021).
 22. I. S. Choi, [Datacenter's representative site] naver's "gak", <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=4525>, July(2017).
 23. H. J. Kim, J. Y. Lee, C. G. Yun, C. S. Jeong, Application of outdoor air cooling system in data center, in *Proceedings of the Annual Meeting of SAREK*, SAREK, pp. 214-218(2014).
 24. G. Anusooya, V. Vijayakumar, V. Neela Narayanan, Reducing the carbon emission by early prediction of peak time load in a data center, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(5), 4341-4348(2019).
 25. N. Gohring, How amazon's new seattle office buildings will recycle 'waste heat' from nearby data centers, <https://www.geekwire.com/2014/amazon-gets-green-light-heat-new-buildings-westin-building-data-centers/>, September(2014).
 26. M. Monroe, How to reuse waste heat from data centers intelligently, <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2016/05/10/how-to-reuse-waste-heat-from-data-centers-intelligently>, May(2016).
 27. A. Alley, Facebook begins data center and district heating expansion in odense, denmark, <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/facebook-begins-data-center-and-district-heating-expansion-odense-denmark/>, (2020).
 28. D. Leprince-Ringuet, Facebook is recycling heat from its data centers to warm up these homes, <https://www.zdnet.com/article/facebook-is-recycling-heat-from-its-data-centers-to-warm-up-these-homes/>, July(2020).
 29. A. Alley, Facebook plugs its danish data center into odense district heating system, <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/facebook-begins-installing-district-heating-system-odense-data-center-denmark/>, July(2020).
 30. CGTN, Re-using waste heat: sweden using heat from data centers to power residences, https://news.cgtn.com/news/3d6b6a4d79634464776c6d636a4e6e62684a4856/share_p.html, December(2017).
 31. LG CNS, 'Data center' joins energy saving with eco-friendly technology!, <https://blog.lgcns.com/881>, (2015).
 32. Korea Data Center Association, *Data center solutions guidebook 2020*, KDCC, (2020).
 33. J. G. Jo, Introduction to green data center in the united states: facebook data center, *korean society of architecture*, 71-76 (2013).
 34. Korea Data Center Association, *Korea data center market 2021-2024*, KDCC, (2021).
 35. Y. T. Chae, J. H. Lee, A comparative analysis of cooling (heat source) system performance in the data center, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korea Institute of Registered Architects*, KIRA, pp. 1002(2017).
 36. M. S. Park, Y. W. Hwang, D. Y. Kim, S. J. Yang, J. Y. Moon, Evaluation of economic benefits and greenhouse gas emissions for district heating utilization of waste heat in data centers, *Journal of KSWM*, 39(2), 152-159(2022).
 37. S. H. Park, J. H. Seo, Economic evaluation of outdoor air-conditioning system in the data center, *Journal of SAREK*,

26(4), 145-150(2014).

38. H. S. Lee, Why global data centers are going to the netherlands, https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=180&CONTENTS_NO=1&bbsGbn=243&bbsSn=243&pNttSn=190264, August (2021).
39. M. Wiboonrat, Energy loss model for tier 2 and tier 3 data centers, *Science & Technology*, 29(1), 1-8(2022).
40. Sandip R. Rajesh Bose, Haraprasad Mondal, Dipan Roy Chowdhury, Srabanti Chakraborty, Energy-efficient approach to lower the carbon emissions of data centers, *Computing*, 103, 1703-1721(2021).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Jaeryang Park

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, [ORCID](#) 0000-0001-7159-6567: Writing - original draft.

Hojin Jang

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, [ORCID](#) 0000-0003-3996-9831: Writing - original draft.

Sinhyeok Choi

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, [ORCID](#) 0000-0002-6457-3786: Writing - original draft.

Ryeong Jung

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, [ORCID](#) 0000-0002-7130-5237: Writing - original draft.

Sokhee P. Jung

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Associate Professor, [ORCID](#) 0000-0002-3566-5649: Funding acquisition, Project administration, Resources, Supervision, Writing - review and editing.