

# 기후 시나리오 SSP5와 SSP1에서의 2100년 서울 지역에서의 여름철 주택 냉방을 위한 하이브리드 제습 냉방 시스템 성능 분석

이울호 · 박성진<sup>†</sup>

홍익대학교 일반대학원 기계공학과

## Performance Analysis of a Hybrid Desiccant Cooling System for Residential Air Conditioning in the Seoul Region under the Climate Scenarios SSP5 and SSP1

YULHO LEE, SUNGJIN PARK<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Hongik University General Graduate School, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
parksj@hongik.ac.kr

Received 30 October, 2023  
Revised 23 November, 2023  
Accepted 4 December, 2023

**Abstract >>** In this study, a comparative analysis between an electric heat pump cooling system and a hybrid desiccant cooling system is conducted. Desiccant cooling is a thermal driven system with potentially lower electric power consumption than electric heat pump. Hybrid desiccant cooling system simulation includes components such as a desiccant rotor, direct and indirect evaporative coolers, heat exchangers, fans, and a heat pump system. Using dynamic simulations by climate conditions, house cooling temperatures and power consumption for both systems are analyzed for 16 days period in the summer season under climate scenarios for the year 2100 prediction. The results reveal that the hybrid desiccant cooling system exhibits a 5-18% reduction in electric consumption compared to the heat pump system.

**Key words :** Hybrid desiccant cooling system(하이브리드 제습 냉방 시스템), Air conditioning(에어컨 냉방), Fuel cell thermal application(연료전지 폐열 활용), System simulation(시스템 시뮬레이션), Climate change scenarios(기후 변화 시나리오), Renewable energy(재생에너지)

## 1. 서론

거주지의 냉방 수요는 에어컨의 발명 이후 꾸준히 늘어 왔다. 현대에 이르러서는 도심 지역에서 여름철 필수적인 가전제품이 되었고 미래에는 평균 온도 상

승으로 인해 생존을 위한 필수품이 될 수 있다. 중국의 냉방 사용량은 경제 발전과 함께 급격히 상승해 전체 가구의 60%가 냉방을 사용하고 있다. 그러나 아직 인도, 태국 등의 아시아 국가들은 전체 가구의 10%도 사용하지 않아 냉방용 기기 사용의 잠재적 성

장성이 매우 크다<sup>1)</sup>. 2018년 기준 동남아시아의 가구 냉방 사용 전력량은 약 50 TWh이지만 2040년에는 약 200 TWh까지 증가할 것으로 예측된다<sup>1,2)</sup>. 이는 현재 피크 냉방 수요에서 전체 전력량의 약 10%를 차지하지만 2040년에는 약 30%까지 증가하게 될 것으로 보인다. 냉방의 수요를 감당하기 위해 많은 전력을 발전해야 하는데 이에 대한 전력량을 줄이기 위해서는 에어컨의 효율을 높이고 실내의 단열 및 지붕과 벽의 열손실을 줄여야 한다. 히트펌프 에어컨의 효율을 나타내는 coefficient of performance (COP)는 현재 약 4의 값을 달성하였다. 만약 전기가 아닌 버려지는 열을 활용해 냉방 에너지로 전환하면 여름철 높은 전력 효율을 가지는 냉방 시스템을 운영할 수 있다<sup>3)</sup>.

뜨거운 여름철에 전력이나 화석연료를 사용하지 않고 냉방을 하는 방법은 물의 증발열을 활용한 냉각 방법이 있다. 증발열을 이용하기 위해서는 극도로 낮은 습도를 가진 공기가 필요한데 이때 열을 사용해 건조한 습공기를 생성하고 물의 증발열로 냉각하면 냉방에 필요한 공기를 얻을 수 있다. 이를 제습 냉방 시스템이라 한다. 그러나 제습 냉방 시스템만으로는 외기 40°C를 넘어가는 극한의 고온 조건에서는 냉방 성능이 충분히 나오지 않기 때문에 기존의 히트펌프를 후단에서 추가 냉각해 함께 사용하는 하이브리드 제습 냉방 시스템이 과거에 제안되었고<sup>4)</sup>, 본 연구 이전에 제안된 시스템을 참고해 모델을 개발하여 온도 및 습도에 따른 성능을 분석하였다<sup>5,6)</sup>. Yang 등<sup>7)</sup>은 새로운 증발 냉각기와 히트펌프 시스템으로 에너지와 엑서지 분석을 통해 제습 냉방을 제안하였고, Liang 등<sup>8)</sup>은 지열을 이용한 하이브리드 제습 냉방 시스템의 성능 평가를 하였다. Chen 등<sup>9)</sup>은 액체 제습을 이용한 저온열 조건에서의 하이브리드 제습 냉방 시스템의 성능을 분석하였고, Jani 등<sup>10,11)</sup>은 실험을 통해 고온 고습의 날씨 조건에서 하이브리드 제습 냉방 시스템의 효율성과 운전 조건에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 본 연구에서는 실제 날씨 데이터를 기반으로 극한의 조건까지 고려해 하이브리드 제습 냉방 시스템의 냉방 성능을 분석하고자

모델 개발 및 분석을 진행하였다.

본 논문에서는 미래인 2100년의 예측된 서울 날씨 데이터를 통해 기존의 에어컨이 사용하는 전력과 열 에너지를 활용한 하이브리드 제습 냉방 시스템의 성능과 에너지 사용량을 주거용 건물 조건에서 비교하고 분석하였다. 2100년까지의 날씨는 기상청과 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 시나리오를 기준으로 데이터를 수집했고 이를 시간별 데이터로 구성하였다. 그리고 지구 평균 온도가 약 1°C 정도 상승한 현재 2021년의 서울 날씨와 2100년에 시나리오에 따라 예측한 날씨 데이터에서의 결과를 비교하였다. 이를 보면 가장 적은 탄소를 배출하는 시나리오에서는 2100년 기준 서울 평년 온도가 15.8°C이지만 최악의 시나리오에서의 평년 온도는 21.2°C이다. 이러한 고온의 여름철에 하이브리드 제습 냉방 시스템의 성능을 분석하기 위해 Matlab-Simulink-Simscape (MathWorks, Natick, MA, USA) 모델링을 하였고 모델의 구성은 집의 열 모델, 제습제 모델, 증발 냉각기 모델, 증발기, 응축기, 압축기, 팽창 밸브, 열교환기, 팬 모델로 개발하였다. 개발된 모델을 통해 여름철 혹서기에서의 히트펌프와 하이브리드 제습 냉방 시스템의 두 시스템 모델과 2100년의 시나리오에 따른 기후 조건에서 성능과 효율을 분석하였다

## 2. 기후 및 날씨 데이터

### 2.1 기후 변화 예측 데이터

IPCC는 90년대부터 기후 변화 보고서를 꾸준히 발간하고 있다. 최근에 들어서는 예측에 관한 구체적인 데이터를 함께 공개를 하고 있다. 2013년에 나온 5차 보고서와 2022년에 나온 6차 보고서에서 탄소 배출 전략에 따른 시나리오에는 각각 representative concentration pathway (RCP) 시나리오와 shared socioeconomic pathway (SSP) 시나리오가 있는데 여기서는 6차 보고서의 SSP 시나리오를 기준으로 예측된 날씨 데이터를 사용했다<sup>12)</sup>. SSP 시나리오에서 RCP

시나리오와 비교해 가장 크게 달라진 점은 공유된 사회경제적 경로를 고려하여 적극적인 화석연료 사용에 따른 SSP5 시나리오가 있다는 점이다. SSP5 시나리오는 사회경제가 성장에 가장 큰 초점을 맞춘 것으로 사회경제가 가장 빠르게 성장할 수 있는 화석연료의 적극적 사용을 허용하는 시나리오에서의 기후 변화를 예측한 것이다. 2013년의 5차 보고서의 RCP 시나리오에서는 가장 많은 탄소 배출량 계산에 현재 배출하는 수준까지의 화석연료 사용량을 그대로 사용했지만 SSP5 시나리오는 경제 성장을 위하여 현재보다 더 적극적인 탄소 배출량 상승을 예측한 데이터이다. SSP1 시나리오는 2050년에 탄소 배출 제로를 목표로 사회경제가 모두 함께 즉시 대규모로 노력하는 시나리오이다. 이를 보면 탄소 배출량 및 온도 상승은 SSP5 시나리오에서 2100년 이산화탄소 배출량은 120 Gt-CO<sub>2</sub>가 넘는 양으로 2020년 기준 40 Gt-CO<sub>2</sub>에 비해 크게 증가한 배출량이다. 이때 온도 변화는 연평균 온도 21.2°C, 여름 최고 온도 43°C, 겨울 최저 온도 -6°C를 기록한다. SSP1 시나리오는 2100년 이산화탄소 배출량 음수를 목표로 설정되어 있는 시나리오로, 현재보다 탄소 배출량은 현저히 낮지만 기온은 이전에 쌓인 탄소에 의해 2020년과 비슷하거나 조금 높을 것으로 전망한다<sup>13)</sup>. 본 연구에서는 2100년을 예측한 SSP5와 SSP1 시나리오의 기후에서의 온도와 습도에 따른 냉난방 시스템의 성능 분석을 진행하였다.

## 2.2 서울의 SSP 시나리오 데이터

IPCC 6차 보고서의 예측된 날씨 데이터는 기상청의 기후 정보 포털 및 IPCC를 통해 얻었다<sup>14)</sup>. 2020년부터 2100년까지 날씨의 일간(daily) 데이터를 서울(위도 37.57°N, 경도 126.97°E)을 기준으로 수집하였다. 수집된 데이터는 일평균 기온, 최고 기온, 최저 기온, 평균 습도가 있고 일평균 데이터를 토대로 시간별 데이터를 추정하고 이를 시스템 시뮬레이션에 적용하였다. Fig. 1은 평균 온도, 습도, 최고 온도, 최저 온도, 강수량 데이터 중 최고 온도 데이터만 가져

온 것이다. 일평균 데이터는 하루 단위의 데이터이기 때문에 정확한 냉방 시스템 분석을 위해서는 시간별 데이터로 수정해야 한다. 이를 위하여 기상청의 기존 시간별 데이터를 2100년의 일일 최고 온도, 최저 온도, 습도에 맞게 조정해 시간별 데이터를 확보하였다. 이에 따라 입력 데이터에 심각한 이상 기후 같은 열섬, 폭우, 태풍은 반영되기 어렵지만 하루 냉방 시간, 최고 기온에서의 냉방 에너지, 열대야에서의 냉방 에너지, 여름 길이에 따른 냉방 에너지를 비교할 수 있다. 후처리한 전체 데이터 중 시뮬레이션은 여름철 혹서기의 16일간의 데이터 결과를 분석하였다.

## 3. 하이브리드 제습 냉방 시스템

하이브리드 제습 냉방 시스템은 기본적인 히트펌프 시스템 구성에서 증발기의 공기 입구 전 단계에서 제습로터로 제습 과정과 증발기에서의 냉각을 1차적으로 거친 공기가 증발기와 마지막으로 추가적인 냉각을 마무리한 후 실내에 공급된다. 본 논문에서 개발된 히트펌프 모델과 하이브리드 제습 냉방 시스템의 사양은 Tables 1, 2와 같다.

전체적인 시스템은 Matlab-Simulink 프로그램을 기반으로 Simscape의 냉방 시스템을 참고해 모델링하였다<sup>5,6)</sup>. 히트펌프 시스템은 R-410a 냉매를 사용한 히트펌프가 사용되었고, 여름철 80-90°C의 폐열을 사

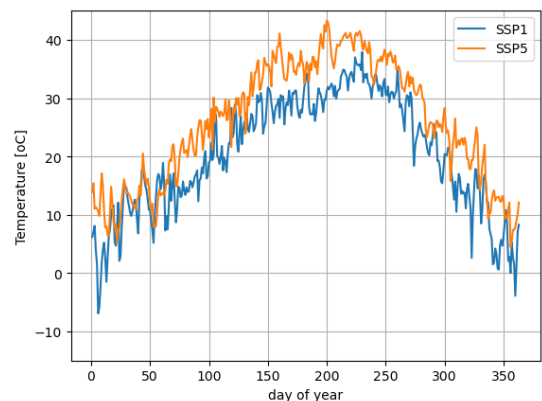


Fig. 1. 2100 year daily max temperature in SSP scenario report

용할 수 있는 제습기와 건조한 공기에 물의 증발열

을 활용해 냉각 효과를 가져올 수 있는 증발 냉각기 시스템을 모델링하였다. 제습 냉방 시스템은 Fig. 2와 같이 실리카겔 제습로터와 열교환기, 간접 증발 냉각기로 구성되어 있다.

**Table 1.** Specification of electric heat pump

Specification	Value	unit
Rated power	4	kW
Maximum power	5.5	kW
T evaporation	5	°C
T condensation	45	°C
$\eta$ volumetric	0.9	-
$\eta$ mechanical	0.9	-
Rated COP	3.25	-

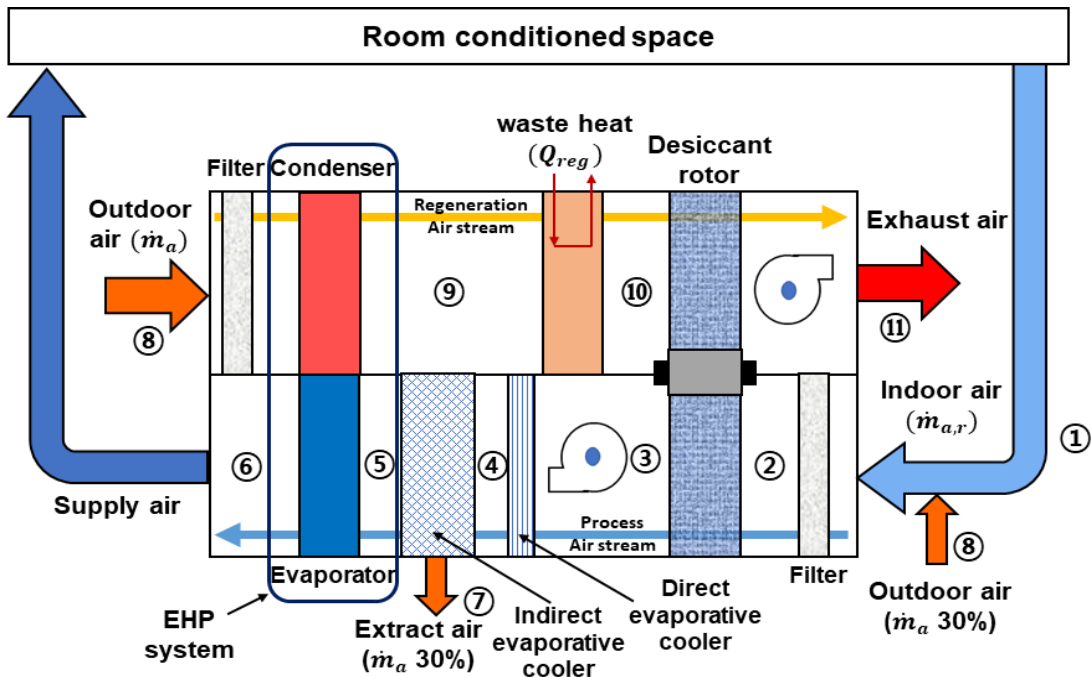
**Table 2.** Specification of hybrid desiccant cooling system

Specification	Value	unit
T Regeneration	80	°C
Rated cooling load	5	kW
Rated thermal consumption	18	kW
Rated electrical power consumption	1	kW

### 3.1 실리카겔 제습로터

제습로터는 실리카겔 재질로 되어 있고 재생 부분과 제습 부분은 1:1 비율로 가정해 모델링하였다<sup>15,16</sup>. 제습로터의 성능은 기존 연구를 통해 실험 결과와 모델을 검증하였다<sup>17</sup>. 제습로터는 공기 온도와 습도 그리고 재생 온도에 따라 성능이 결정되는데 실리카겔의 수분 흡착량( $\theta$ )은 식 (1)과 같이 결정할 수 있다.

$$\theta = 0.106 \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{8590} \right)^2 \right] + 0.242 \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{3140} \right)^2 \right] \quad (1)$$



**Fig. 2.** Air-flow and component description of hybrid desiccant cooling system

여기서 흡착 잠재력( $\epsilon$ )은 공기의 습도(RH)와 온도(T), 이상기체 상수(R)를 통해 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = -RT \ln(RH) \quad (2)$$

이후에 흡착량에 따라 공기의 습도가 결정되면 Polanyi 이론에 따라 제습로터의 질량 보존 방정식은 식 (3)과 같이 재생과 제습량으로 나타낼 수 있다.

$$(x_{inlet} - x_{out})U_{air}\rho_{air} = (x_e - x_{initial})h_m A_s \quad (3)$$

제습로터의 입구와 출구의 절대습도(x), 공기의 유량(U), 공기의 밀도( $\rho$ )로 나타낼 수 있는 습도 변화량은 제습로터의 절대습도와 초기 습도와의 차이로 나타낼 수 있다. 여기서  $h_m$ 은 로터의 물질 전달 효율이고  $A_s$ 는 제습로터 계면의 면적을 나타낸다. 본 연구에서는 재생에 필요한 열은 안정적으로 제공된다고 가정하기 때문에 제습로터의 재생 온도는 80°C로 일정하게 유지하였다. 개발된 모델의 공기의 입구 온도와 습도에 따른 제습 성능을 Fig. 3과 같이 검증하였다.

### 3.2 간접 증발 냉각기

간접 증발 냉각기는 제습로터를 지나 건조해진 공기를 물의 증발열을 이용하여 냉각시키는 장치이다. 이때 약 30%의 공기만 물과의 직접 접촉으로 증발 냉각되고 나머지 공기는 냉각된 공기와 간접 접촉으로 열교환을 통해 냉각된다. 입출구 공기의 습도( $x_i, x_o$ )와 유량( $\dot{m}_{air}$ )에 따라 증발량( $\dot{m}_{vap}$ )이 결정되고 출구의 냉각된 공기의 온도가 결정되는데, 이때 증발열( $\dot{Q}_{vap}$ )은 다음과 같이 증발된 물의 양과 증발 엔탈피를 통해 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{vap} = (x_o - x_i)\dot{m}_{air} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{vap} = \Delta H_{vap}\dot{m}_{vap} \quad (5)$$

이에 대한 원리는 Fig. 4의 오른쪽과 같이 나타나 있다. 31°C의 7% 습도의 공기가 들어갈 시 최종적으로 나오는 냉각된 공기의 온도는 약 15°C이고 이때의 습도는 67%이다. 버려지는 공기는 17°C의 99%

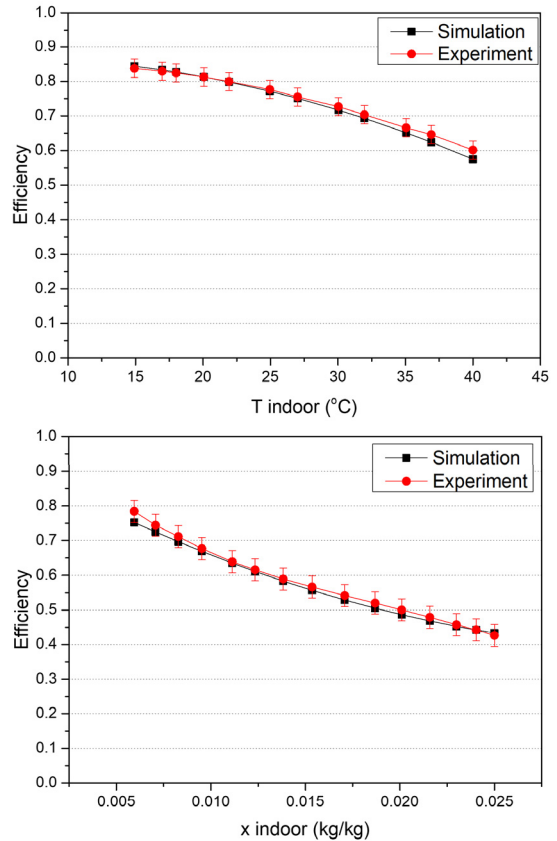


Fig. 3. Validation of desiccant rotor model by rotor indoor temperature, humidity

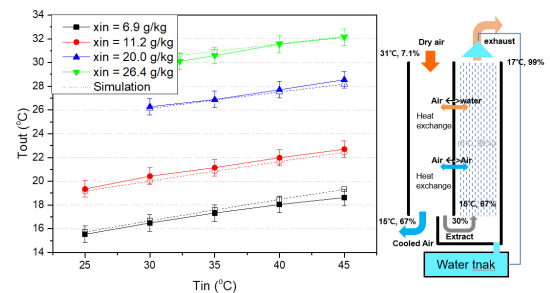


Fig. 4. Validation of indirect evaporative cooler model by inlet air temperature and humidity

습공기이다. 개발된 모델은 실제 실험 결과와 비교를 통해 온도와 습도에 따라 검증하였다<sup>18,19</sup>. Fig. 4의 왼쪽의 그래프는 간접 증발 냉각기의 입구 온도와 습도에 따라 출구의 냉각된 온도를 검증한 결과이다.

### 3.3 히트펌프 증발기

히트펌프 냉방기 모델은 Matlab 냉방 사이클 모델을 참고해 모델링하였다. 냉매는 R410-a이고 압축기의 정격 출력은 3,000 rpm에서 4 kW이며 냉매의 압축 및 증발 시 압력은 각각 3, 1 MPa이다. 증발 시 과냉각 온도 한계는 0°C이다. 응축기의 출력은 식 (6)과 같이 엔탈피(h)와 냉매 유량(m), 효율(η)을 통해 구할 수 있다.

$$P_{comp} = \eta_{comp} (h_2 - h_1) \dot{m}_r \quad (6)$$

하이브리드 제습 냉방 시스템에서 히트펌프 증발기에 들어오는 공기는 제습로터와 간접 증발기를 거쳐 1차로 냉각된 공기이고, 히트펌프 증발기에서 최종 냉각된 후 실내로 공급된다.

### 3.4 실내 경계 조건

집 역시 Matlab-Simulink-Simscape 집 냉방 모델을 참고해 모델링하였다. 집 모델의 경계 조건은 실외의 온도와 집 열저항 모델 그리고 실내 공기의 온도 및 실내 발열로 이루어져 있다. 외부 공기 온도는 집 외부의 지붕, 벽, 창문과 맞닿아 있고 내부 벽과 인테리어 열용량의 저항을 거쳐 실내의 공기 온도와 맞닿는다. 집의 내외부 열 모델에 대한 설명은 Fig. 5와 같이 나타내었다. 실외의 평균 대류 열전달계수는 약한 바람과 비슷한 38 W/(m²K)이고 실내는 거의 바람이 없는 12 W/(m²K)를 사용하였다. 실내의 평균 열전도율은 0.038 W/(mK)이다. 실내 면적은 200 m²로 이때 실내 발열량은 4명의 사람이 70 W씩 280 W, 전자기기 및 주방기기의 발열량은 500 W의 조건

이다<sup>20</sup>.

## 4. 냉방 시스템 해석 결과

### 4.1 냉방 시스템 제어

냉방 시스템 가동에서 제어 기준은 낮 시간대(09-21시)에는 실내 온도 기준 21-24°C로 온도 제어를 했고 저녁 시간대(21시-09시)에는 25-28°C로 온도 제어를 했다. 제습 냉방 시스템은 간접 증발 냉각기에서 물을 증발시킨 공기 중 30%인 고온다습한 공기를 배출해야 하기 때문에 집 내부 공기가 다시 냉각을 위해 증발기 입구 쪽으로 들어갈 때 외부 공기를 시스템에 넣는다.

### 4.2 탄소배출 시나리오에 따른 외기 온습도 조건

SSP1과 SSP5의 날씨 데이터는 일평균 온도, 습도, 최고 기온, 최저 기온, 강수량 정보를 확인할 수 있다. 다만 시뮬레이션에서는 온도와 습도 정보만을 사용하였다. 평균 온도, 최고 기온, 최저 기온 데이터를 통해 시간 단위 온도 데이터를 추출하고 이를 입력 데이터로 사용하고 평균 습도 데이터를 통해 역시 시간 단위 데이터를 추출해 사용하였다. 일 단위 데이터를 시간 단위 데이터로 확장하기 위해서는 기존의 2021년 날씨 데이터를 사용하였다. 시간에 따른 2021년의 온도 데이터를 SSP1과 SSP5의 날씨 데이터에 대입해 최고 온도와 최저 온도를 고려한 데이

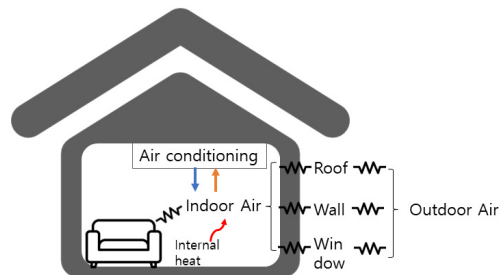


Fig. 5. Thermal model diagram of house

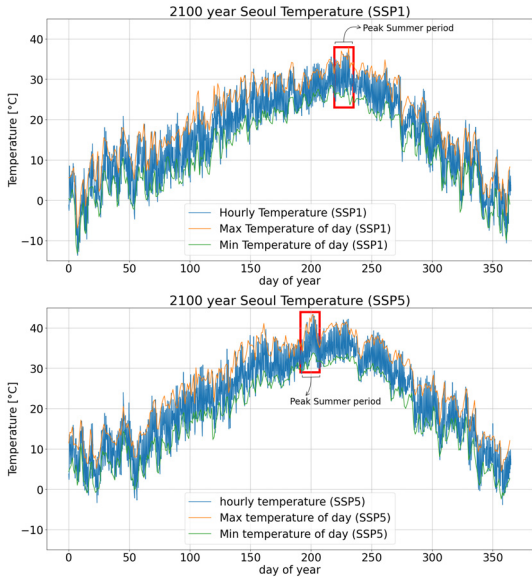


Fig. 6. Temperature data of climate change scenario of SSP1 and SSP5 hourly

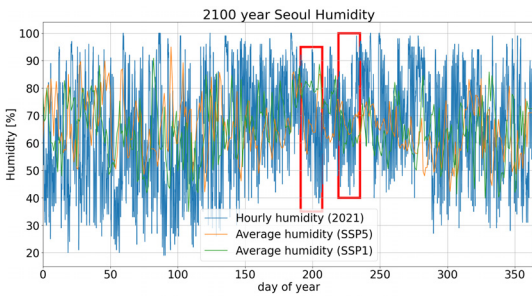


Fig. 7. Humidity data of climate change scenario of SSP1 and SSP5 hourly

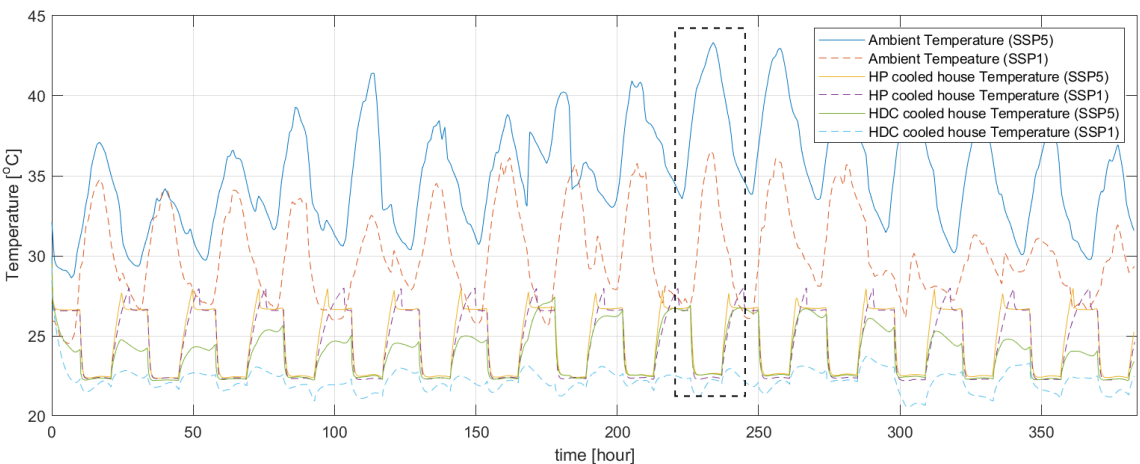


Fig. 8. Cooled house temperature of HP and HDC system by climate of SSP1, SSP5 (14 days)

터로 후처리 후 사용하였다. 이들 중 시간 단위 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 낮 최고 기온은 SSP1에서는 8월 16일 오후 4시, SSP5에선 7월 19일 오후 5시에 해당한다. 습도 데이터는 Fig. 7과 같이 2021년의 데이터를 참고해 SSP 시나리오의 평균 습도에 맞춰 2100년의 습도 데이터로 사용하였다.

### 4.3 여름철 피크 부하에서의 냉방 해석 결과

여름철 최고 기온이 있는 16일간의 여름철 냉방 결과를 Figs. 8-10에 나타내었다. 최고 기온을 나타내는 날과 전후 일주일을 포함해 16일(1,382,400초)을 시뮬레이션하였다.

Fig. 8는 시뮬레이션의 외기 온도와 히트펌프, 하이브리드 제습 냉방 결과 집의 온도를 나타낸다. 가장 높은 온도를 나타내는 SSP5에서 낮 최고 기온은 43°C에 육박하고 저녁에도 최저 기온이 28°C를 웃돌기 때문에 24시간 냉방이 필요한 조건이라고 볼 수 있다. SSP1에서는 낮 최고 기온이 약 36°C로 SSP5보다 7°C 정도 낮은 온도를 보이고 저녁 시간에는 26°C에 도달하는 것을 알 수 있다. 최고 온도 지점에서 하루 동안 히트펌프와 하이브리드 제습 냉방한 결과를 확대한 그래프를 Figs. 11, 12에서 볼 수 있다. 두 그래프를 보면 냉방 기준 온도가 28°C로 바뀌

는 저녁 9시부터(가로축의 237 hour) 몇 시간 정도 정지되는 것을 제외하고 항상 냉방 온도에 도달하기 위해 운전이 되는 것을 볼 수 있고, SSP5에서는 냉방이 정지되는 동안 집의 온도가 더 가파르게 올라 정지 시간이 더 짧다.

Fig. 12의 하이브리드 제습 냉방의 결과를 보면 두 시나리오 조건 모두 저녁 시간에는 제습 시스템이 상시 운전으로만 설정 온도 이하로 냉방이 가능하다. SSP1 조건에서는 히트펌프를 사용하지 않아도 하이브리드 제습 냉방 시스템만으로 23-24°C를 상시 유지한다. Fig. 12의 소비전력을 보면 하이브리드 제습

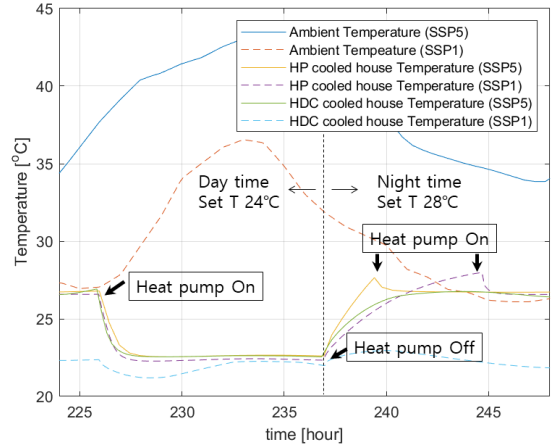


Fig. 11. House temperature of HP and HDC (a day)

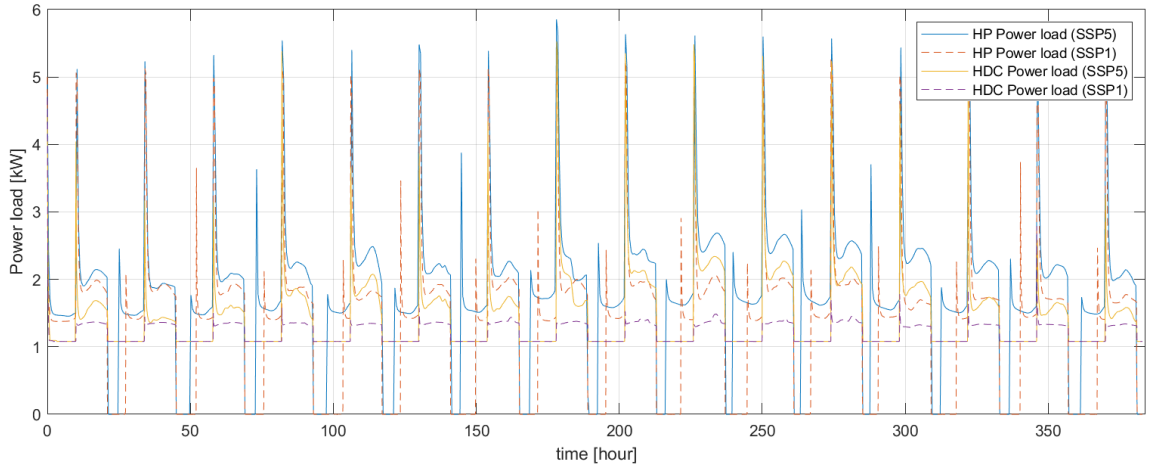


Fig. 9. Electric power consumption of HP and HDC system by climate of SSP1, SSP5 (14 days)

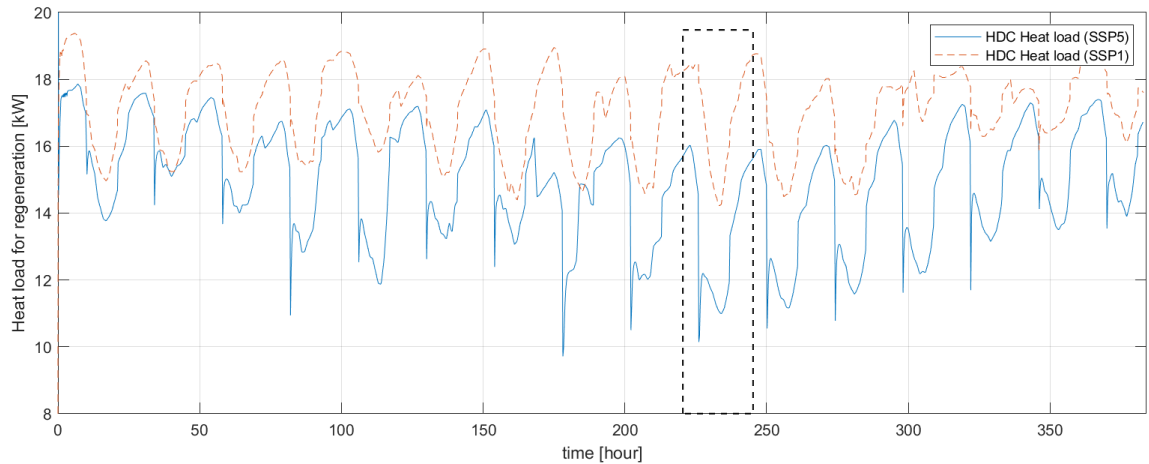


Fig. 10. Thermal consumption of HDC system by climate of SSP1, SSP5 (14 days)



냉방의 SSP1 시나리오의 결과가 히트펌프 SSP5와 SSP1의 소비전력 사이에 위치하는 것을 할 수 있다. 온도가 높아 소비전력이 높은 SSP5의 히트펌프 시스템과 하이브리드 시스템을 보면 히트펌프의 전력은 최대 피크점(Fig. 12)에서 약 5.85 kW까지 사용하는 것을 알 수 있으며, 저녁 시간에도 28°C로 냉방하기 위해 최대 3.8 kW를 사용한다. 하이브리드 제습 냉방 시스템도 최대 전력 피크점(Fig. 12)에서는 약 5.5 kW로 히트펌프와 큰 차이를 보이지 않지만 기온이 40°C가 넘어가는 혹서기의 경우에만 피크 전력 사용량이 5 kW를 넘어가고 이 외에는 피크점이 3-4 kW

에 달하는 것을 알 수 있다.

하이브리드 제습 냉방 시스템은 열에너지를 지속적으로 제공받을 경우에 히트펌프가 꺼져도 상시 운전한다고 가정한다면 저녁 시간에도 팬을 계속 운전해 최저 출력이 약 1 kW로 유지된다. 하지만 하이브리드 제습 냉방 시스템이 더 빠르게 정상 소비전력과 설정 온도에 도달한다. 하이브리드 제습 냉방은 저녁 시간에 목표 온도보다 낮게 냉방이 되는 구간이 있지만 이는 따로 팬 유량을 낮추지 않아서 나타난 결과이다. 즉, 더 세세한 제어를 통해 하이브리드 제습 냉방 시스템의 전력 사용량을 감소시킬 수 있는 가능성이 있다.

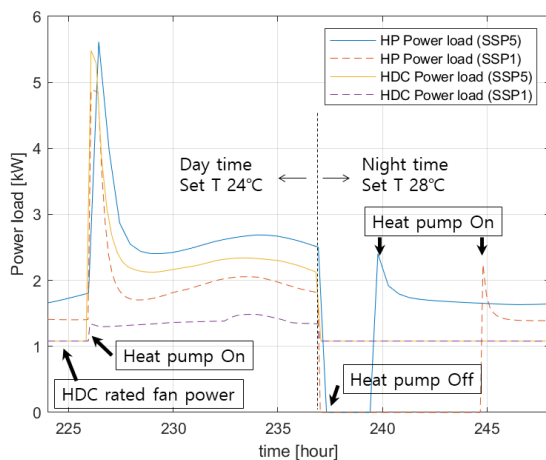


Fig. 12. Power consumption of HP and HDC (a day)

#### 4.4 히트펌프와 하이브리드 제습 냉방 시스템 에너지 사용량 분석

두 시나리오에서의 히트펌프와 하이브리드 제습 냉방 시스템의 전력은 Fig. 9에 나타내었다. 이를 다시 하루 단위 전력 사용량으로 Fig. 13에 나타냈는데 하이브리드 제습 냉방 시스템은 SSP5 시나리오에서 히트펌프에 비해 비슷한 온도 또는 더 낮은 온도로 냉방을 유지하면서도 적은 전력 사용량을 보이고 있다. 10일째의 최고 온도 지점에서의 하루 전기에너지 사용량은 SSP5에서 히트펌프가 47.2 kWh, 하이브리드 제습 냉방이 39.9 kWh를 사용하였고, SSP1에서

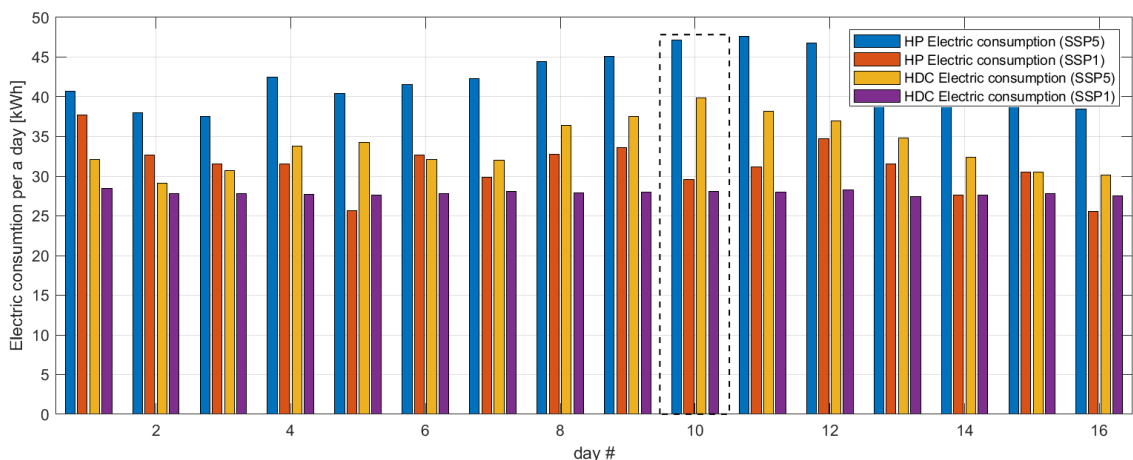


Fig. 13. Power consumption per a day of HP and HDC by SSP1, SSP5 for 14 days

는 히트펌프가 29.6 kWh, 하이브리드 제습 냉방이 28.1 kWh를 사용하였다. 16일 동안 냉방을 할 때 SSP1과 SSP5의 냉방에너지를 비교하면 SSP5에서 여름철 최고 기온 구간인 16일간 소비전력량은 히트펌프 기준 684 kWh로 SSP1의 히트펌프 소비전력량인 499 kWh와 비해 약 37% 늘어난 소비전력량을 보인다. 이를 SSP1의 평년 온도 15.8°C와 SSP5의 평년 온도 21.2°C의 5.4°C 차이로 보면, 평균 온도가 1°C 상승할수록 6.9%의 냉방에너지 상승을 보인다. 16일간 하이브리드 제습 냉방의 소비전력량은 SSP5 시나리오에서 557 kWh, SSP1 시나리오에서 462 kWh로 약 20%의 증가를 보인다. 2100년 중 SSP1 시나리오에서 냉방이 필요할 25°C 이상의 시간은 Fig. 7의 데이터를 통해 산출해 보면 연중 2,139시간으로 단순 일수로 나타내면 약 89일이다. 2100년 SSP5 시나리오의 냉방 필요 시간은 3,722시간이고 단순 일수로 나타내면 약 155일이다. 2021년 기준 서울의 25°C 가 넘는 냉방 시간은 약 1,444시간으로 SSP1의 냉방 시간보다 500시간이 적은 수치이다. SSP5 시나리오에서는 2021년 대비 최대 2.5배 이상 냉방 시간이 늘어날 수 있다.

#### 4.5 여름철 피크 부하에서의 하이브리드 제습 냉방 시스템 열에너지 사용량 분석

하이브리드 제습 냉방 시스템은 상시 운전되기 때문에 열에너지가 항상 필요하다. SSP5와 SSP1의 열에너지 사용량을 Figs. 10, 14에 나타냈다. 고온의 외기를 가져와 높은 온도의 공기를 만들기 때문에 기온에 따라 필요한 열에너지가 바뀌는 것을 볼 수 있다. SSP5에서는 외기 온도가 항상 더 높기 때문에 모든 구간에서 SSP1보다 적다. 또한 SSP5의 열 사용량이 중간에 급격히 떨어지는 경우가 있는데, 이는 히트펌프의 응축기를 거쳐 한번 가열된 공기를 사용하기 때문에 필요한 열이 감소하였기 때문이다. 반면에 SSP1에서의 하이브리드 제습 냉방 시스템은 히트펌프가 가동되는 구간이 적기 때문에 응축기로 인해 열에너지 사용량이 감소하는 구간이 아주 적게 나타

난다.

### 5. 결론

하이브리드 제습 냉방 시스템 모델을 통해 2100년 IPCC가 예측한 최악의 시나리오인 SSP5와 최선의 시나리오인 SSP1의 서울 날씨 조건에서 냉방 시스템들의 성능과 에너지 사용량을 Table 3에 나타냈다. 주택의 냉방 시스템 모델을 Matlab-Simulink-Simscape를 활용해 개발하였고 하이브리드 제습 냉방 시스템의 제습로터와 간접 증발 냉각기는 기존 연구의 실험 데이터와 비교하여 검증하였다. 하이브리드 제습 냉방 시스템 모델뿐만 아니라 기존의 히트펌프 냉방 시스템 모델과 동일 조건에서 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) IPCC가 예측한 SSP5와 SSP1의 시나리오에서 냉방이 필요하다고 보는 25°C 이상의 기간은 2100년

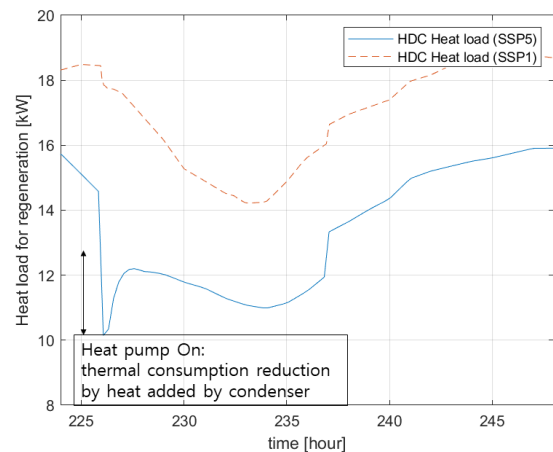


Fig. 14. Thermal consumption of HDC system (a day)

Table 3. Energy consumption comparison (HDC, EHP)

Specification	HDC [kWh]		Electric heat pump [kWh]
	(thermal)	(electric)	
SSP1 (a day)	405	28.1	29.6
SSP5 (a day)	323	39.9	47.2
SSP1 (16 days)	6525	462	498
SSP5 (16 days)	5706	557	683

SSP5는 1년에 3,722시간(155일)이고 SSP1은 2,139시간(89일)이다. 2021년의 25°C 이상인 시간은 1,444시간(60일)이다.

2) 폐열을 활용한 냉방에너지를 얻을 수 있는 하이브리드 제습 냉방 시스템 모델과 기존 모델인 전기식 히트펌프 시스템 모델을 개발해 예측된 기후 변화 시나리오에서 해석 비교하였다.

3) 하루 동안의 냉방 결과를 비교하면 하이브리드 제습 냉방 시스템은 저녁과 새벽 시간에는 증발열만으로 냉방에너지를 확보 가능하지만 히트펌프 시스템은 저녁과 새벽 시간에 실내 온도가 올라가 다시 재가동되며, 하루 소비전력 역시 SSP5 기준 히트펌프 47.2 kWh, 하이브리드 제습 냉방 시스템 39.9 kWh로 차이가 난다. 다만 기온이 크게 높지 않고 히트펌프가 저녁 시간에 긴 시간 동안 가동하지 않는 SSP1의 시나리오에서는 히트펌프는 29.6 kWh, 하이브리드 제습 냉방 시스템은 28.1 kWh로 큰 차이가 나지 않는다.

4) 냉방일 16일 연속 운전 결과를 비교하면 SSP5와 SSP1 시나리오에서의 소비전력 차이는 히트펌프 시스템 기준 SSP1 대비 최대 약 37% 늘어난다. 하이브리드 제습 냉방 시스템은 SSP5에서 557 kWh, SSP1에서 462 kWh로 약 20% 차이를 보이고, 히트펌프 시스템과 비교해 SSP5 시나리오에선 18% 더 적은 전력을 사용하였으며, SSP1 시나리오에선 7% 더 적은 전력을 사용하였다. 이는 같은 16일 동안의 연속 냉방을 비교한 것으로 SSP5로 갈수록 고온의 날이 더 길어지기 때문에 전체 여름철 냉방에너지 사용량은 훨씬 더 큰 차이를 보이게 될 것이다. 차후에 제습 냉방 시스템의 최적 제어를 통해 유량과 히트펌프의 on/off를 적절히 제어한다면 본 연구보다 더 많은 소비전력이 감소할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(RS-2022-00144016)

과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2021R1A2C1095028)을 받아 수행된 연구임.

## References

1. International Energy Agency (IEA), "The future of cooling in Southeast Asia: increasing energy efficiency through stronger policy action", IEA, 2019. Retrieved from <https://www.iaea.org/reports/the-future-of-cooling-in-southeast-asia>.
2. International Energy Agency (IEA), "The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning", IEA, 2018. Retrieved from <https://www.iaea.org/reports/the-future-of-cooling>.
3. J. In, Y. Lee, S. Kang, and S. Park, "Analysis of performance and energy saving of a SOFC-based hybrid desiccant cooling system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 136-146, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.136>.
4. D. La, Y. J. Dai, Y. Li, R. Z. Wang, and T. S. Ge, "Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, 2010, pp. 130-147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.016>.
5. Y. Lee, S. Park, and S. Kang, "Performance analysis of a solid desiccant cooling system for a residential air conditioning system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 182, 2021, pp. 116091, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116091>.
6. Y. Lee, S. Park, and S. Kang, "Operational optimization of a hybrid desiccant cooling system for building air conditioning system", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 59, 2023, pp. 39-54, doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03240-z>.
7. Y. Yang, C. Ren, C. Yang, M. Tu, B. Luo, and J. Fu, "Energy and exergy performance comparison of conventional, dew point and new external-cooling indirect evaporative coolers", *Energy Conversion and Management*, Vol. 230, 2021, pp. 113824, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113824>.
8. J. D. Liang, C. L. Kao, L. K. Tsai, Y. C. Chiang, H. C. Tsai, and S. L. Chen, "Performance investigation of a hybrid ground-assisted desiccant cooling system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 265, 2022, pp. 115765, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115765>.
9. Y. Chen, Y. Yin, and X. Zhang, "Performance analysis of a hybrid air-conditioning system dehumidified by liquid desiccant with low temperature and low concentration", *Energy and Buildings*, Vol. 77, 2014, pp. 91-102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.050>.

10. D. B. Jani, M. Mishra, and P. K. Sahoo, "Experimental investigation on solid desiccant-vapor compression hybrid air-conditioning system in hot and humid weather" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 104, 2016, pp. 556-564, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.104>.
11. D. B. Jani, M. Mishra, and P. K. Sahoo, "Investigations on effect of operational conditions on performance of solid desiccant based hybrid cooling system in hot and humid climate", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 7, 2018, pp. 76-86, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.05.005>.
12. H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. M. B. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, "Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change", IPCC, 2022. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
13. K. Riahi, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O'Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, S. KC, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bossett, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau, and M. Tavoni, "The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview", *Global Environmental Change*, Vol. 42, 2017, pp. 153-168, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
14. Korea Meteorological Administration (KMA), "Climate change scenario", KMA, 2023. Retrieved from [http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents\\_2021/35\\_download.php](http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/35_download.php).
15. E. Van Den Bulck, "Analysis of solid desiccant rotary dehumidifiers [Master's thesis]", Madison (WI): University of Wisconsin-Madison; 1983.
16. G. Stiesch, "Performance of rotary enthalpy exchangers [Master's thesis]", Madison (WI): University of Wisconsin-Madison; 1994.
17. F. E. Nia, D. van Paassen, and M. H. Saidi, "Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning", *Energy and Buildings*, Vol. 38, No. 10, 2006, pp. 1230-1239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.020>.
18. B. Riangvilaikul and S. Kumar, "An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system", *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 5, 2010, pp. 637-644, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.034>.
19. J. Lee and D. Y. Lee, "Experimental study of a counter flow regenerative evaporative cooler with finned channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, 2013, pp. 173-179, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.069>.
20. Korean Agency for Technology and Standards, "KS C 9306: air-conditioner", Korean Standards Service Network, 2017. Retrieved from <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro?getStandardSearchView.do?ksNo=KSC9306>.