



# 데이터센터 전력공급을 위한 하이브리드 에너지 시스템 연구

방영석<sup>1)</sup> · 김건엽<sup>1)</sup> · 신소은<sup>1)</sup> · 나하늘<sup>2)</sup> · 김기태<sup>2)\*</sup>

## A Study on Hybrid Energy Systems for Data Center Power Supply

Youngsuk Bang<sup>1)</sup> · Keon Yeop Kim<sup>1)</sup> · So Eun Shin<sup>1)</sup> · Ha Neul Na<sup>2)</sup> · Gi Tae Kim<sup>2)\*</sup>

Received 25 October 2025 Revised 2 December 2025 Accepted 11 December 2025 Published online 23 December 2025

**ABSTRACT** The expansion of AI and data centers is accelerating the growth of electricity demand, while international climate agreements highlight the increasing importance of carbon-free energy sources. Wind and solar power represent major renewable options, but their intermittency due to environmental conditions poses challenges for a stable power supply. In parallel, data center electricity demand exhibits substantial daily variability depending on utilization. This study analyzed the variability of renewable energy generation and data center power demand to assess the feasibility of maintaining a stable power balance, and identified the need for a reliable power supply through energy storage systems (ESS) and baseload power sources. The results further emphasize the potential role of nuclear energy as a complementary option for ensuring a stable and sustainable electricity supply.

**Key words** Data center(데이터센터), Renewable energy(재생에너지), Nuclear energy(원자력발전), Power supply(전력 공급)

### Nomenclature

$f^{\max}$  : maximum standard air flow [CMH] (14000CMH for a 7.5 kW CRAH unit)

$p_i$  : *i*th server's power consumption [W]

$p_i^{\text{idle}}$  : *i*th server's power consumption without load [W]

$p_i^{\text{peak}}$  : *i*th server's power consumption at full load [W]

$v$  : wind speed [m/s]

$v_{\text{cut\_in}}$  : cut-in wind speed [m/s]

$v_{\text{rated}}$  : rated wind speed [m/s]

$v_{\text{cut\_out}}$  : cut-out wind speed [m/s]

$u_i$  : *i*th server's utilization

$A$  : wind turbine rotor swept area [m<sup>2</sup>]

$L$  : data center task consolidation

$P_{DC}$  : data center total power consumption [W]

$P_{sf}$  : server farm power consumption [W]

$P_{sf}^{\max}$  : server farm power consumption at full load [W]

$P_{CRAH}$  : control room air handling system (CRAH) power consumption [W]

$P_{chiller}$  : chiller power consumption [W]

$P_{UPS}$  : uninterruptible power source (UPS) power consumption (loss) [W]

$P_{UPS}^{\text{idle}}$  : uninterruptible power source (UPS) power consumption (loss) without load [W]

1) General Manager, Future and Challenge Tech. Co. Ltd.

2) Associate Manager, Future and Challenge Tech. Co. Ltd.

\*Corresponding author: [tae7172@fnctech.com](mailto:tae7172@fnctech.com)

Tel: +82-31-8065-5135 Fax: +82-31-8065-5111

- $P_{PDU}$  : power distribution unit (PDU) power consumption (loss) [W]
- $P_{PDU}^{idle}$  : power distribution unit (PDU) power consumption (loss) without load [W]
- $P_r$  : wind turbine rated power generation [W]
- $S$  : photovoltaic panel array area [m<sup>2</sup>]
- $T$  : ambient temperature [°C]
- $U$  : data center utilization
- $\lambda_{PDU}$  : square-law power loss coefficient of PDU
- $\lambda_{UPS}$  : proportional power loss coefficient of UPS
- $\eta_{CRAH}$  : efficiency of the heat removal from the system
- $\eta_{PV}$  : efficiency of the photovoltaic panel power conversion
- $\Phi$  : irradiation [W/m<sup>2</sup>]

## 1. 서론

인공지능(AI) 기술의 확산과 데이터센터의 급격한 확대는 전 세계적으로 전력수요 증가를 가속화하고 있다. 미국에서는 하이퍼스케일 데이터센터와 AI 기반 연산 수요가 전력소비 증가를 견인하고 있으며, 한국 역시 대규모 데이터센터 건립과 국가 디지털 인프라 확충 정책에 따라 전력수요가 빠르게 증가하고 있다. 이러한 전력수요 증가는 기반산업의 안정적 발전뿐만 아니라 글로벌 기술 경쟁력 확보를 위해 필수적인 요소로 작용하고 있다.<sup>[1]</sup>

한편, 기후협약 이행과 탄소배출권 제도의 도입에 따라 전 세계적으로 신·재생에너지 보급이 확대되고 있다. 대표적인 재생에너지원으로는 풍력과 태양광이 있으며, 한국 또한 매년 발전설비 용량을 증설하여 신·재생에너지 발전 비중을 점진적으로 확대하고 있다.<sup>[2]</sup> 그러나 풍속이나 일사량 등 환경 요건에 크게 의존하는 특성으로 인해 발전량의 간헐성이 발생하며, 이는 전력계통의 안정성과 전력수급 신뢰성 확보에 주요한 장애요인으로 작용하고 있다.<sup>[3]</sup>

이에 비해 원자력에너지는 무탄소 발전원으로서 높은 에너지 밀도와 안정적인 전력생산 능력을 보유하고 있으며, 최근 글로벌 에너지 안보 이슈와 맞물려 그 중요성이 재조명되고 있다.<sup>[4]</sup> 특히 간헐적인 신·재생에너지원의 비중이

확대됨에 따라 전력계통의 유연성이 요구되고 있으며, 이에 따라 기존에 기저부하를 담당하던 원자력발전소에도 출력 조정운전(load-following)과 다목적 활용이 필요해지고 있다.<sup>[5]</sup>

이러한 배경 속에서, 개별 발전원의 장단점과 전력사용처의 특성을 고려한 최적의 구성 및 운영 조합을 모색하기 위해 Integrated Energy System(IES)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[6~9]</sup> 특히 다양한 에너지 계통을 모사하기 위해 Modelica 기반의 통합 플랫폼을 활용한 모델링이 개발되고 있으며, 단기·중기·장기적 관점에서 다목적 에너지 믹스로 구성된 통합에너지시스템의 분석, 인공지능 기반 운전, 디지털 트윈 적용 가능성 등에 관한 연구도 이루어지고 있다.<sup>[10~12]</sup> 특히, 원자력과 신·재생에너지를 결합한 IES는 Nuclear Renewable Hybrid Energy System(NRHES)로 연구되었으며, 거시적 동적거동, 최적 구성안 및 운영방안 도출을 위한 전산체계를 구축하고 다양한 분석을 수행하였다.<sup>[13~15]</sup>

본 연구에서는 이러한 IES 및 NRHES 연구의 연장선에서 데이터센터 모델을 추가하고, 이에 대한 전력공급을 위한 시스템 구성안을 분석하였다. 즉, 전력수요 변동성과 신·재생에너지원의 발전 특성을 분석함으로써 안정적인 전력공급을 달성하기 위한 원자력에너지의 보완적 활용 가능성을 고찰하였다. 이를 위해 공개된 문헌 자료를 기반으로 데이터센터 전력수요 및 풍력·태양광 발전량에 대한 물리적 모델을 구축하였으며, 실제 데이터를 활용하여 발전량과 전력수요의 경향성 및 전력 수급 가능성을 평가하였다. 이러한 분석 결과를 토대로 원자력발전의 출력 조정운전 적용 가능성을 검토하고, 신·재생에너지와 연계한 하이브리드 에너지 시스템 구성 방안을 제안하였다.

## 2. 원자력-재생에너지 하이브리드 에너지 시스템(NRHES) 연구

NRHES(Nuclear-Renewable Hybrid Energy System)는 원자력과 신·재생에너지를 결합하여 각 발전원의 장점을 극대화하고 단점을 상호 보완함으로써 전력 공급의 효율성과 경제성을 향상시키기 위해 제안된 개념이다. 즉, 재생에너지 발전 비중이 높아 전력 수요 변동성이 큰 지역

에서 적용할 수 있는 시스템으로, 수소 생산·지역난방·담수화 등 공정열 수요처에 열에너지를 공급할 수 있도록 한다. 예시로 전력 수요가 낮은 주간에는 원자력발전소 이차계통에서 증기를 추출해 열에너지를 저장하고 공정열 설비에 활용함으로써 전력망 안정성 확보와 에너지 활용 극대화를 도모할 수 있다. 또한 열에너지저장시스템(TES, Thermal Energy Storage System)을 도입하면 주간의 잉여 증기를 저장해 활용할 수 있어 전력망 부하를 저감하고 에너지 효율성을 더욱 향상시킬 수 있다. 이는 탄소중립, 에너지전환정책 등 글로벌 정책 기조에 따라 신·재생에너지 비중이 확대되고, 기존의 중앙집중·수직통합형 구조에서 수평분권화 및 소형화로 전환되는 에너지 시스템의 변화 흐름 속에서 중요성이 더욱 부각되고 있다.

선행 연구인 “NRHES 설계 및 제어기술 개발<sup>[16]</sup>”에서는 NRHES에 대한 전산 해석 체계를 구축하고, 공정열 설비의 연계 운전에서 요구되는 유연성 확보 및 운전 전략 최적화 방안을 제시하였다. 또한 경제성 평가를 통해 NRHES의 최적 구성안을 도출하였다. 특히, 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발한 소형모듈원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)를 기반으로 NRHES 개념을 구현하였다. 이를 위해 Modelica 기반의 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, SMART를 구성하는 주요 부품—냉각재 계통, 증기발생기, 이차측 터빈, 복수기, 급수가열기, 급수펌프, 탈기 등—의 전산모델을 개발하고 모듈화하여 SMART 일차측 및 이차측 계통을 모델링하였다. 또한, 이차측 분기 배관에서 증기를 추출해 중간열교환기(MIHX)를 통해 수소 생산, 담수화 플랜트, 지역난방 등 공정열 설비에 열을 공급하는 구성을 고려하였다. 아울러 열에너지 저장시스템(TES, Thermal Energy Storage System)을 도입하여 원자력발전소의 잉여 전력을 열 형태로 저장·활용하는 방안도 검토되었다.

Fig. 1은 이러한 NRHES 구성 중 원전-고온수전해(Hybrid High-Temperature Electrolysis) 플랜트 연계 해석 모델의 예시를 나타낸 것이다. Fig. 2는 전력 수요 변화에 따라 증기 추출률을 제어하여 발전소의 전력 생산량을 조절하는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 원전에서 추출된 증기는 TES에 저장된 뒤 공정열 설비로 공급되어 열에너지로 활용될 수 있다. Fig. 3에는 NRHES 최적구성안의 예시

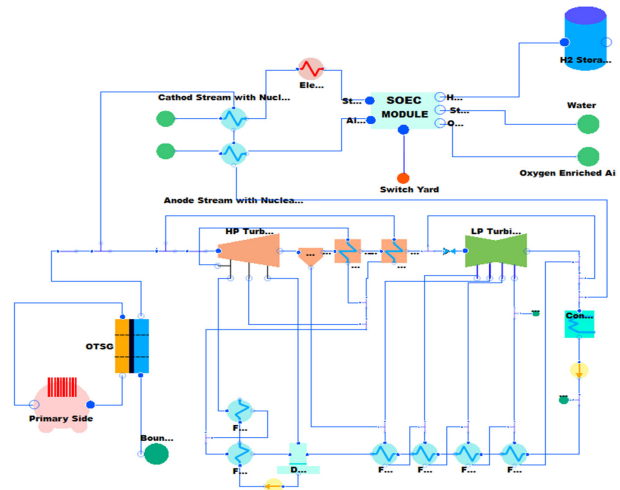


Fig. 1. An example of a coupled nuclear power-high temperature electrolysis plant analysis model using modelica

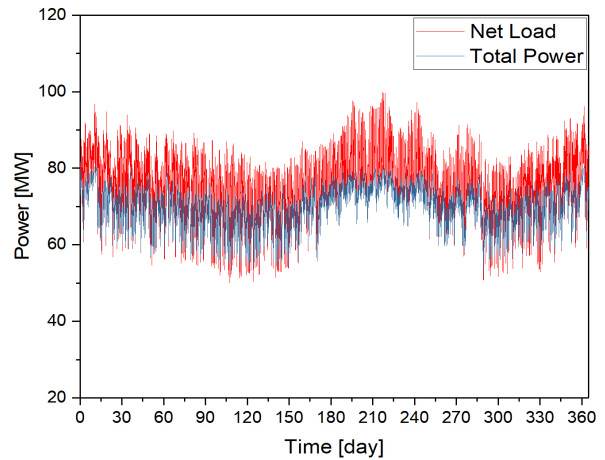


Fig. 2. Example comparison of net electricity demand and NRHES power generation

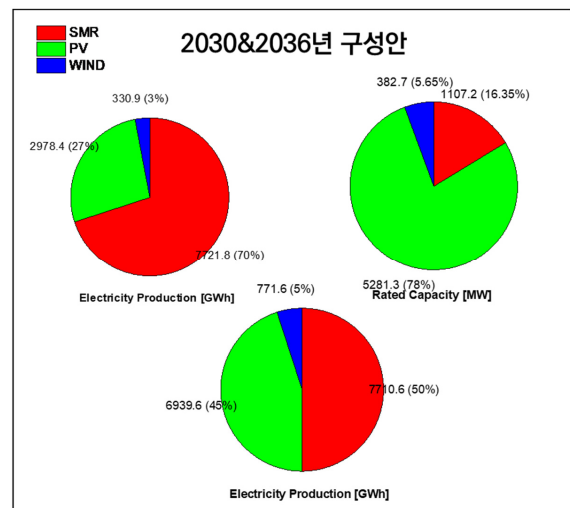


Fig. 3. Example of an optimal NRHES configuration

를 나타낸다. 즉, 주어진 환경조건에서 신·재생 발전량 비중이 전체의 30%이고, 그 중 태양광이 90%, 풍력이 10%인 경우 균등화 발전단가가 가장 낮게 산출됨을 확인하였다.

### 3. 하이브리드 에너지 시스템 개별 모듈 개발

본 장에서는 데이터센터 전력 요구량과 풍력 및 태양광 발전 전력 생산량을 산정하기 위한 수치모델의 구성 및 개별 모듈의 예비 분석 결과를 제시한다. 데이터센터의 전력 공급 특성을 환경적 요인에 따라 평가하기 위해, 본 연구에서는 특정 설비에 한정된 세부 모델링보다는 일반적이고 단순화된 모델링 방식을 채택하여 전반적 거동을 모사하는데 중점을 두었다. 또한, 향후 보다 구체적인 자료와 고도화된 모델을 적용함으로써 연구 목적에 부합하는 방향으로 모델의 정밀성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

#### 3.1 데이터센터 모델링

데이터센터의 전력사용률 평가에는 Fig. 4에 제시된 주기기를 대상으로 수행되었다.<sup>[13~21]</sup> 다만, 데이터센터 운영에 수반되는 기타 기반 시설의 전력 소모나 전동, 난방과 같은 소규모 부하 설비는 분석 대상에서 제외하였다. 이에 따라, 데이터센터의 총 전력요구량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{DC} = P_{sf} + P_{UPS} + P_{PDU} + P_{CRAH} + P_{chiller} \quad (1)$$

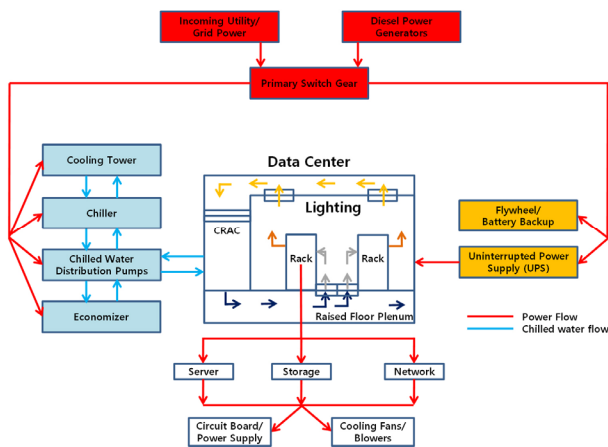


Fig. 4. Power and chilled water flow in a typical data center<sup>[13]</sup>

#### 3.1.1 서버 전력사용량 ( $P_{sf}$ )

개별 서버의 전력사용량은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i = p_i^{idle} + (p_i^{peak} - p_i^{idle}) \times u_i \quad (2)$$

한편, 개별 서버의 이용도는 운영방식에 따라 달라질 수 있다.

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (3)$$

$$u_i = \frac{U}{L \times (1 - U) + U} \quad (4)$$

즉,  $L=0$ 인 경우는 작업량을 최소한의 서버에 집중시키는 완전통합방식이고,  $L=1$ 인 경우는 작업량을 모든 서버에 분산시키는 완전분산방식이다. 개별서버의 전력사용률은 설계 및 제작사에 따라 다른데, SPEC(Standard Performance Evaluation Corporation)에서는 매년 분기별로 참여기관들의 서버시스템의 성능 대비 전력효율을 평가하고 공개하고 있으며, 예시를 Fig. 5에 나타내었다.<sup>[22]</sup>

#### 3.1.2 UPS 및 PDU 전력사용량( $P_{UPS}$ , $P_{PDU}$ )

UPS 및 PDU의 전력사용량은 설계 및 제작사에 따라 다른데, 기본적으로 식 (5) 및 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

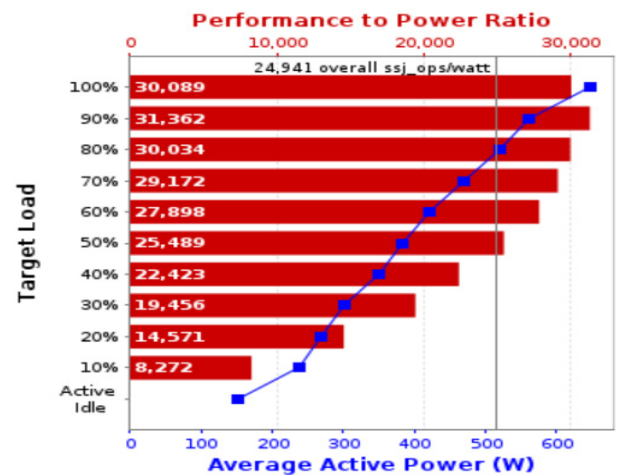


Fig. 5. Example of SPECpower\_ssj2008 results (Compal electronics)<sup>[22]</sup>

즉, 데이터센터 설비의 이용도가 증가함에 따라 전력사용량은 비선형적으로 증가하게 된다.

$$P_{PDU} = P_{PDU}^{idle} + \lambda_{PDU} \sum_{i=1}^{N_{sf}} (P_{sf,i})^2 \quad (5)$$

$$P_{UPS} = P_{UPS}^{idle} + \lambda_{UPS} \sum_{i=1}^{N_{PDU}} P_{PDU,i} \quad (6)$$

### 3.1.3 냉각장치(Chiller) 전력사용량( $P_{chiller}$ )

냉각장치의 전력사용량은 설계 및 제작사에 따라 다르며, 특히, 구성 및 설치 방식에 따라 효율에 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이용도에 따른 전력사용량을 식 (7) 과 같은 간단한 곡선으로 제시한 연구결과를 활용하였다.

$$P_{chiller} = 0.7 \times P_{sf}^{max} (\alpha U^2 + \beta U + \gamma) \quad (7)$$

한편, 냉각장치를 통해 제거된 열은 궁극적으로 외부환경으로 전달되어야 하므로 외부온도에 따라 효율이 변화하게 된다. 즉, 냉각장치의 전력사용량에 대한 외부온도의 영향을 고려하기 위해서 Table 1에 제시된 EER로 보정을 한다.<sup>[21]</sup>

### 3.1.4 CRAH 전력사용량( $P_{CRAH}$ )

CRAH의 전력사용량은 설계 및 제작사에 따라 다르며, 특히, 구성 및 설치 방식에 따라 효율에 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이용도에 따른 전력사용량을 식 (8),

Table 1. Energy Efficiency Ratio (EER) of chiller

Ambient Temperature [°C]	EER
0	5.82
5	5.49
10	5.13
15	4.74
20	4.34
25	3.93
30	3.52
35	3.12
41	2.66

식 (9)와 같이 간단한 곡선으로 제시한 연구결과를 활용하였다.

$$P_{CRAH} = 1.33 \times 10^{-5} \times \frac{W_{sf}^{max}}{\eta_{CRAH}} \times f \quad (8)$$

$$f = f^{max} \times U \quad (9)$$

### 3.1.5 데이터센터모델 예비 분석 결과

3.1.1 ~ 3.1.4에 기술한 내용으로 100 MW 규모의 데이터센터를 구성하여 분석을 수행하였다. 본 분석의 초점은 이용도 및 주변 환경온도의 변화에 따른 전력요구량의 변화를 파악하는데 있다. Fig. 6는 주변온도가 20°C일 때, 이용도에 따른 데이터센터 계통별 전력사용량을 나타낸 것이다. 이용도가 0%인 경우에도 전력사용량이 43.3 MW에 달하며, 이때 서버, UPS, PDU, CRAH 및 Chiller의 전력사용 비중은 각각 26.5%, 9.4%, 4.8%, 9.2% 및 50.1%를 나타내었다. 반면, 이용도가 100%일 경우에는 각각 40.3%, 4.8%, 2.8%, 15.3% 및 36.7%를 차지하였다.

Fig. 7은 주변 온도가 10°C와 30°C일 때, 이용도 변화에 따른 전력 사용량을 비교한 결과이다. 주변 온도 변화에 따른 Chiller의 EER(에너지 효율 비율) 변화로 인해, 온도가 10°C일 경우 전력 사용량은 이용도 0%에서 -7.7%, 이용도 100%에서 -5.6% 감소하였다. 반대로, 주변 온도가 30°C로 상승한 경우 전력 사용량은 이용도 0%에서 11.7%, 이용

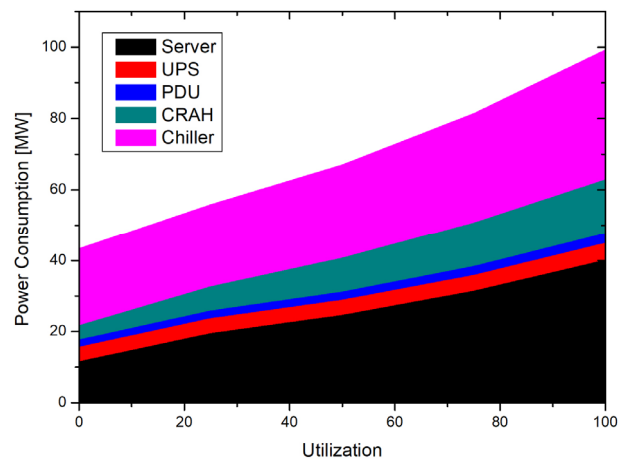


Fig. 6. Variation in data center power usage with utilization (Ambient temperature: 20°C)

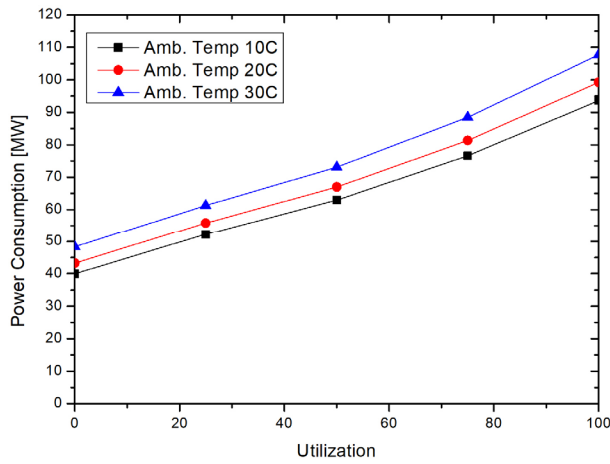


Fig. 7. Variation in data center power usage with utilization under Different Ambient Temperatures

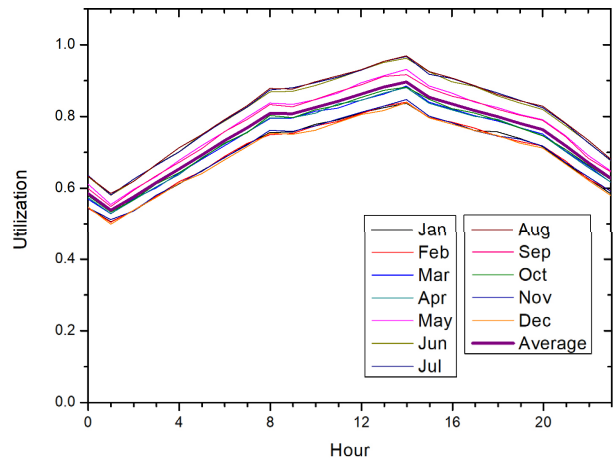


Fig. 9. Daily data center utilization variation (Monthly averages)

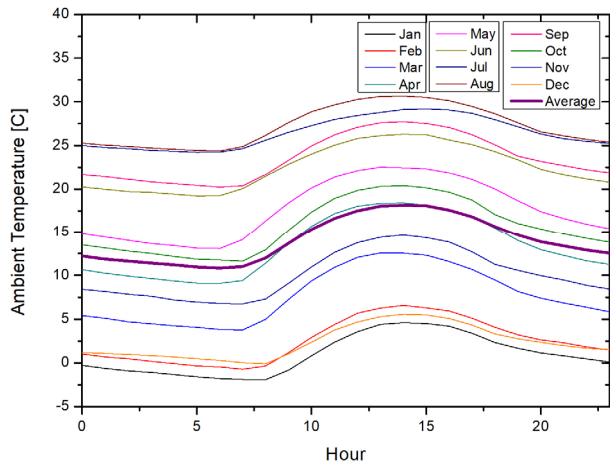


Fig. 8. Daily ambient temperature variation (Monthly averages over 3 years)

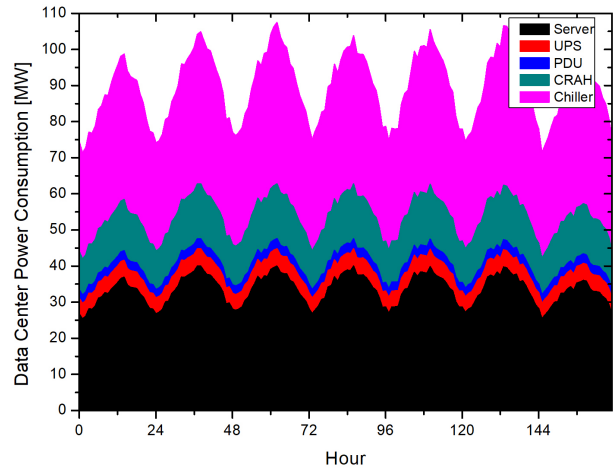


Fig. 10. Data center power usage variation by hour

도 100%에서 8.6% 증가하였다.

Fig. 10은 Fig. 8의 주위 온도와 Fig. 9의 데이터센터 이용도를 입력값으로 하여 계산한 전력 사용량 중, 예시로 제시한 일주일간 전력 사용량 변화를 나타낸 것이다. 주위 온도는 기후 데이터베이스<sup>[23]</sup>를 활용하여 국내 특정 지역의 시간별 기온을 3년간 수집한 후 평균한 값을 적용하였다. 한편, 데이터센터 이용도는 공개된 데이터를 기반으로 가정하여 생성하였다. 즉, 낮 시간에는 클라우드 서비스, 금융 거래, 온라인 활동의 증가로 작업량이 증가하면서 서버 부하가 상승하고, 밤 시간에는 감소하는 것으로 설정하였다. 다만, 글로벌 서비스 제공 특성을 고려하여 최소 50% 이상의 이용도는 유지되는 것으로 가정하였다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 낮 시간 동안 서버 작업량이 증가함에 따라 기타 계통의 전력 사용량도 함께 증가하며, 특히 냉각 계통의 전력 사용량은 비선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 본 예비 분석 결과, 데이터센터의 이용률은 최대 100%에서 최소 45.5%까지 변동하였으며(평균 74.8%, 표준편차 11.8%), 이에 따라 연간 전력 사용량은 최대 110.9 MW에서 최소 57.8 MW까지 변화하는 것으로 나타났다(평균 79.8 MW, 표준편차 10.8 MW).

### 3.2 풍력발전 모델링

풍력발전에 의한 전력생산량은 이론적으로 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>[24]</sup>

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & v < v_{cut\_in} \\ \frac{1}{2} c_{wind} \rho v^3 A & v_{cut\_in} < v < v_{rated} \\ P_r & v_{rated} < v < v_{cut\_out} \\ 0 & v_{cut\_out} < v \end{cases} \quad (10)$$

정확한 풍력 발전량을 산출하기 위해서는 신뢰성 있는 바람 자료가 필수적이며, 이는 주변 지형의 거칠기 등에 따라 달라질 수 있다. 그러나 기상청에서 제공하는 바람 자료는 특정 측정위치에서 표준 관측 고도인 10 m에서 측정된 값으로, 실제 풍차 높이인 80~100 m 고도의 자료가 필요하다. 본 연구에서는 공개된 바람 자료와 발전량 데이터를 비교·분석하여 해당 고도의 바람 자료를 도출하였으며, 이를 후속 계산에 활용하였다.<sup>[25~27]</sup>

Fig. 11에는 월별 풍속의 변화를 고도에 따라 비교하였다. 두 고도에서의 풍속을 비교하여 식 (11)과 같이 환산인자  $\alpha$ 를 계산하여, 10m에서의 풍속을 원하는 고도에서의 풍속으로 보정할 수 있도록 하였다.

$$v = v_a \left( \frac{z}{z_a} \right)^\alpha \quad (11)$$

Fig. 12에는 1.5 MW급의 풍력터빈에 대한 풍속별 발전량을 나타내었다. 기동속도( $v_{cut\_in}$ , 4 m/s) 이상에서 발전이 시작되며, 정격속도( $v_{rated}$ , 13.5 m/s)까지는 식 (10)과 같이 풍속에 따라 발전량이 증가하다가, 정격속도 이상 및

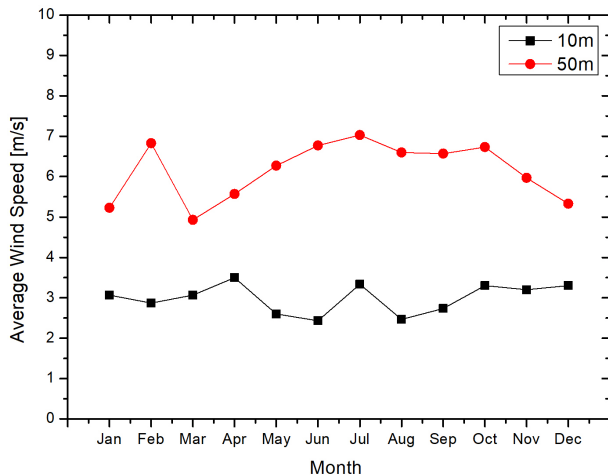


Fig. 11. Monthly wind speed variation comparison

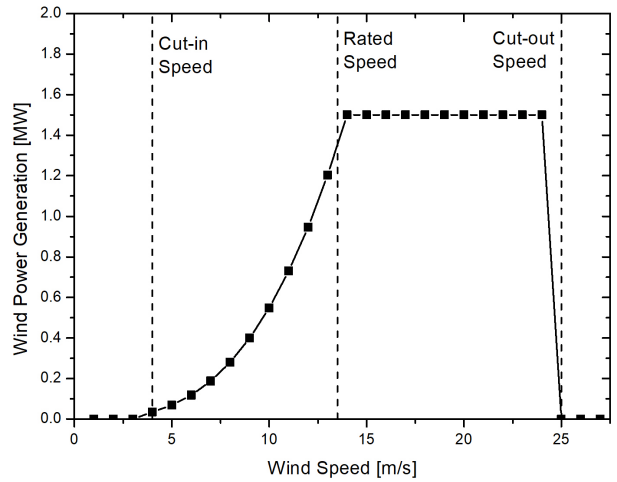


Fig. 12. Wind power generation according to wind speed

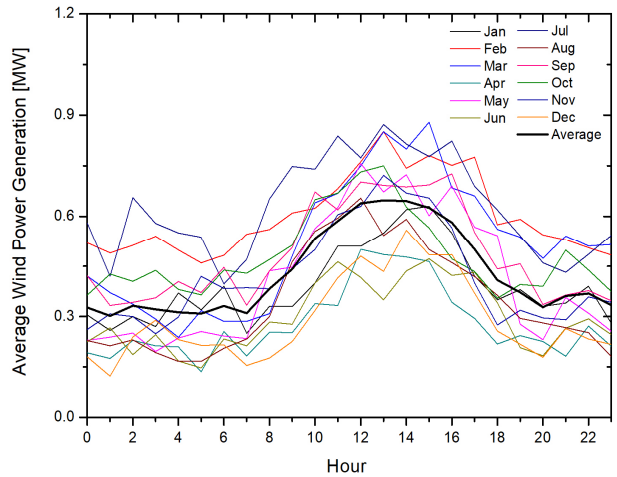


Fig. 13. Hourly wind power generation rate

정지속도( $v_{cut\_out}$ , 25 m/s)까지는 정격출력으로 발전하고, 그 이상의 풍속에서는 정지하는 것으로 하였다.

Fig. 13은 월별 시간대별 평균 풍력 발전량을 나타낸 것이다. 이를 위해 연간 시간대별 풍속 자료를 수집하여 시간대별 발전량을 계산한 뒤, 이를 월별로 평균하여 산정하였다. 일간 발전량은 12시에서 14시 사이에 가장 크게 나타났으며, 계절적으로는 7월과 2~3월에 높은 발전량을 보였다.

### 3.3 태양광발전 모델링

태양광 발전량은 이론적으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 일사량의 변환 효율은 태양광 패널의 제조사 및

설계, 구성에 따라 달라진다. 한편, 태양광 발전은 태양광 패널의 온도에 따라 달라지는 점이 고려되어야 한다.<sup>[28,29]</sup>

$$P_{PV} = \eta_{PV} S \Phi (1 - 0.005(T - 25)) \quad (12)$$

Fig. 14와 Fig. 15는 국내 특정 지역의 시간대별 일사량에 대한 연간 평균값과 월별 일사량을 나타낸 것이다. 이를 위해 연간 시간대별 일사량 자료를 수집하여 각 시간대 및 월별로 평균을 산정하였다. 하루 중 일사량은 낮 시간에 점차 증가하여 약 13시에 최대값을 보인 후, 다시 감소하는 전형적인 일변화 패턴을 나타낸다. 또한, 계절별로는 5월에 가장 높은 일사량을 기록한 반면, 12월에는 가장 낮은 값을 보였다.

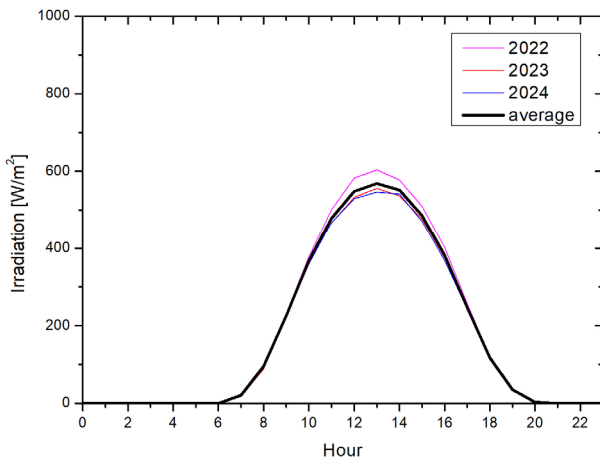


Fig. 14. Hourly solar irradiance (Annual average)

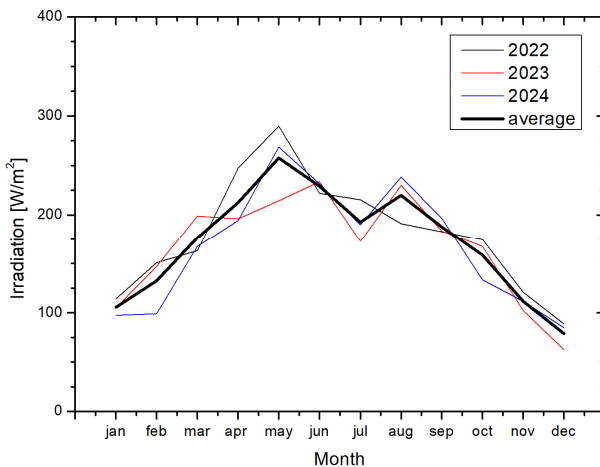


Fig. 15. Monthly solar irradiance variation comparison

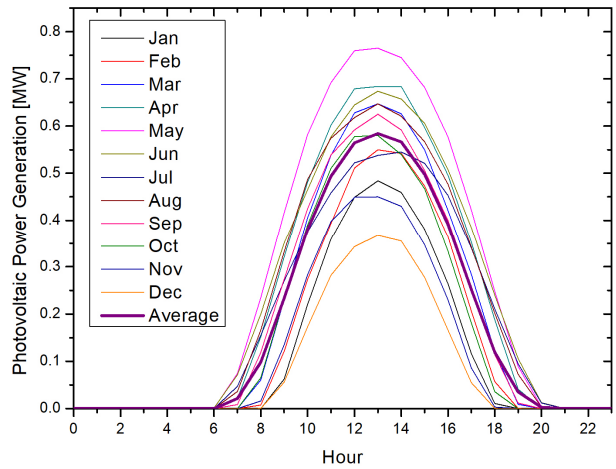


Fig. 16. Hourly solar power generation rate comparison

Fig. 16은 앞서 설명한 시간별 일사량과 온도 자료를 기반으로 계산한 태양광 발전율을 나타낸 것이다. 분석 결과, 일사량이 가장 큰 5월에 최고 발전율을 보였으며, 하루 중에는 정오 무렵에 최대 발전율이 나타났다. 또한, 풍력 발전과 달리 저녁 및 야간 시간대에는 태양광 발전이 전혀 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

#### 4. 하이브리드 에너지 시스템 분석 결과

본 장에서는 앞에서 개발한 개별모듈을 조합하여 다양한 하이브리드 에너지 시스템 구성을 조합하여 분석을 수행하였다. 본 하이브리드 에너지 시스템은 기존 전력계통(국가 또는 지역 전력망)과 연계되지 않고 하나의 구역이 독자적으로 발전·송전·수급 균형을 유지하는 상태인 Power System Island를 가정하였다.

##### 4.1 풍력발전만을 이용한 데이터센터 전력공급

1.5 MW 풍력터빈 65기(총 97.5 MW)를 활용하여 100 MW 규모의 데이터센터에 전력을 공급하는 경우를 평가하였다. 데이터센터 이용도, 기온, 풍속은 앞 장에서 사용한 동일한 자료를 적용하였다. 1년간 전력 수급을 비교한 결과, 데이터센터는 총  $2.52 \times 10^9$  MWh의 전력을 소모한 반면, 풍력발전소는 총  $2.61 \times 10^9$  MWh의 전력을 생산하였다. 그러나 Fig. 17에서 확인할 수 있듯이 전력 수요와 생산

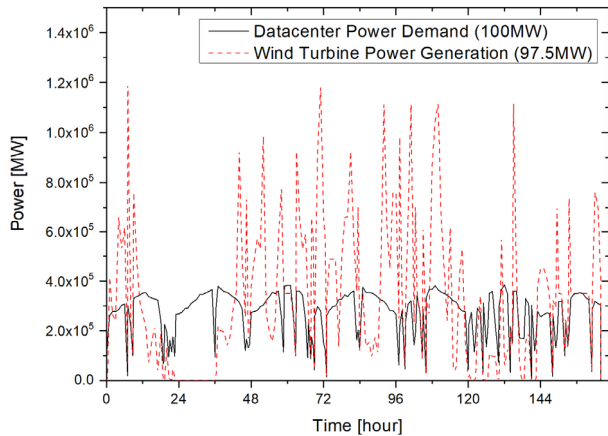


Fig. 17. Data center power supply using only wind energy

간에는 상당한 불일치가 발생하였다. 본 분석에서 고려한 총 8,756시간 중 58.1%의 시간에서는 전력이 부족하였으며, 나머지 41.9%의 시간에는 전력이 과잉 생산되는 것으로 나타났다.

#### 4.2 태양광 발전만을 이용한 데이터센터 전력공급

100 MW 규모의 데이터센터와 500 MW 태양광 발전소를 연계하여 전력 수급을 평가하였다. 데이터센터 이용도, 기온, 일사량은 앞 장에서 사용한 동일한 자료를 적용하였다. 1년간 전력 수급을 비교한 결과, 데이터센터는 총  $2.52 \times 10^9$  MWh의 전력을 소모한 반면, 태양광 발전소는 총  $2.79 \times 10^9$  MWh의 전력을 생산하였다. 그러나 Fig. 18에서 확인할 수 있듯이 전력 수요와 생산 간에는 상당한 불일치가 발생하였다. 본 분석에서 고려한 총 8,756시간 중 63.9%의 시간

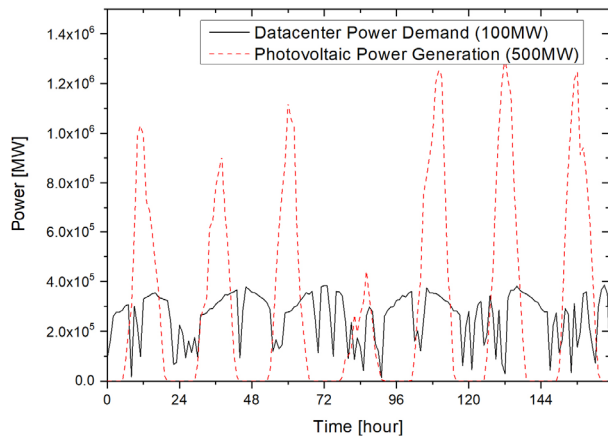


Fig. 18. Data center power supply using only solar energy

에서는 전력이 부족하였으며, 나머지 36.1%의 시간에는 전력이 과잉 생산되는 것으로 나타났다.

#### 4.3 풍력과 태양광 발전을 연계한 데이터센터 전력공급

100 MW 규모의 데이터센터와 1.5 MW 풍력터빈 30기(총 45 MW), 그리고 250 MW 규모의 태양광 발전소를 연계하여 전력 수급을 평가하였다. 데이터센터 이용도, 기온, 일사량, 풍속은 앞 장에서 사용한 동일한 자료를 적용하였다. 1년간 전력 수급을 비교한 결과, 데이터센터는 총  $2.52 \times 10^9$  MWh의 전력을 소모한 반면, 태양광 발전소와 풍력터빈은 각각  $1.40 \times 10^9$  MWh 및  $1.21 \times 10^9$  MWh의 전력을 생산하였다. 그러나 Fig. 19에서 확인할 수 있듯이 전력 수요와 생산 간에는 상당한 불일치가 발생하였다. 본 분석에서 고려한 총 8,756시간 중 59.4%의 시간에서는 전력이 부족하였으며, 40.6%의 시간에는 전력이 과잉 생산되는 것으로 나타났다. 또한, 고려 기간 전체의 시간당 풍력 발전량과 태양광 발전량의 상관계수<sup>1)</sup>는  $-0.6016$ 으로 나타났는데, 이는 태양광 발전량이 많을 때는 풍력 발전량이 적은 경향, 반대로 태양광이 적을 때는 풍력이 상대적으로 많아지는 경향을 보임을 의미한다. 즉, 이런 특성 때문에 두 발전원을 함께 사용하면, 서로의 간헐성을 일정 부분 보완할 수 있다는 장점이 있다.

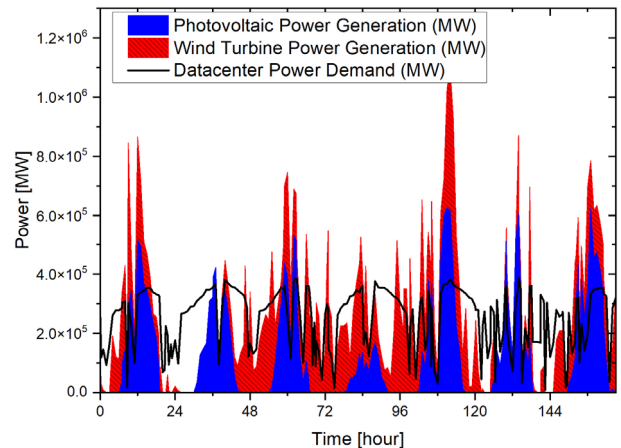


Fig. 19. Data center power supply using both wind and solar energy

1) 상관관계가 1인 경우에는 완전한 양의 상관관계 (한 변수가 증가하면 다른 변수도 증가), -1인 경우에는 완전한 음의 상관관계(한 변수가 증가하면 다른 변수는 감소), 0인 경우에는 상관관계가 없음을 의미

#### 4.4 풍력, 태양광 발전과 전기에너지저장장치(ESS)를 연계한 데이터센터 전력공급

100 MW 규모의 데이터센터와 풍력터빈, 태양광 발전소를 연계하여 80 kW급(설계용량 205 kWh)의 ESS의 설비용량을 평가하였다(Table 2). 데이터센터 이용도, 기온, 일사량, 풍속은 앞 장에서 사용한 동일한 자료를 적용하였다. ESS 필요설비용량은 신·재생에너지 발전 규모에 따라 총 충전량과 AI 데이터센터의 전력 요구량을 종합적으로 고려하여 산정하였다.

에너지 저장 시스템(ESS)의 충전은 전력 계통 내에서 잉여전력, 즉 총 발전량이 데이터센터의 에너지 소비량을 초과하는 시점에 이루어지며, ESS는 설계용량에 도달할 때까지 충전되며, 총 발전량이 데이터센터의 에너지 소비량에 미달하는 경우에는 ESS에 저장된 에너지를 활용하여 부족 전력을 보충하게 된다. 데이터센터에 안정적으로 전력을 공급하기 위해서 ESS의 저장용량이 고갈되지 않도록 적정 용량을 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 ESS의 충·방전량을 분석함으로써 요구되는 ESS 용량을 결정하였다

발전 규모가 지나치게 낮은 경우(Case 1)에는 ESS를 충전할 수 있는 잉여 에너지가 충분하지 않아 운영이 불가능하다. Case 2 ~ Case 5의 경우 ESS 설비용량 측면에서 적절한 수준으로 평가할 수 있으나, 풍력 및 태양광 발전의 간헐성을 보완하기 위해 상당히 과도한 발전 설비 용량이 요구됨을 확인할 수 있다.

Fig. 20에는 Case 2의 시간대별 ESS 충전량을 나타내

Table 2. ESS requirements based on wind and solar power capacity

Case	Wind Turbine [MWe]	Solar [MWe]	ESS Capacity [MWe]
1	45	250	8,000
2	90	500	528
3	180	500	416
4	90	1,000	384
5	180	1,000	368
6	360	2,000	336
7	720	4,000	320
8	1,440	8,000	312
9	2,880	16,000	304

었다. 하절기에는 데이터센터의 전력요구량이 가장 높아 ESS의 에너지 공급량이 증가하며, 이에 따라 총 충전량은 상대적으로 낮게 평가된다. 하절기 동안 풍력, 태양광 및 ESS의 전력공급량은 Fig. 21에 나타내었다.

Fig. 22에는 하절기 동안 풍력, 태양광 발전과 ESS를 연계한 총 전력공급량과 데이터센터의 전력수요를 나타내었다. 풍력 및 태양광 발전과 ESS의 연계를 통해 발전원의 간헐성을 일정부분 보완할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 풍력 및 태양광 발전의 간헐성으로 인해 상당한 양의 전력이 과잉생산 되며, 이를 처리하기 위해 과도한 ESS 설비용량이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

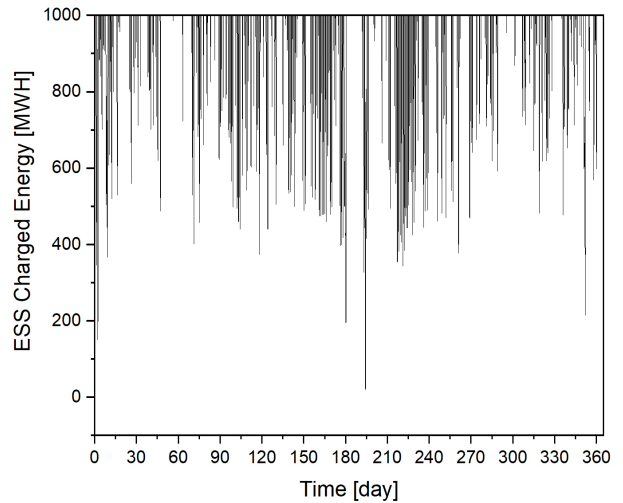


Fig. 20. Total ESS energy charged (Case 2)

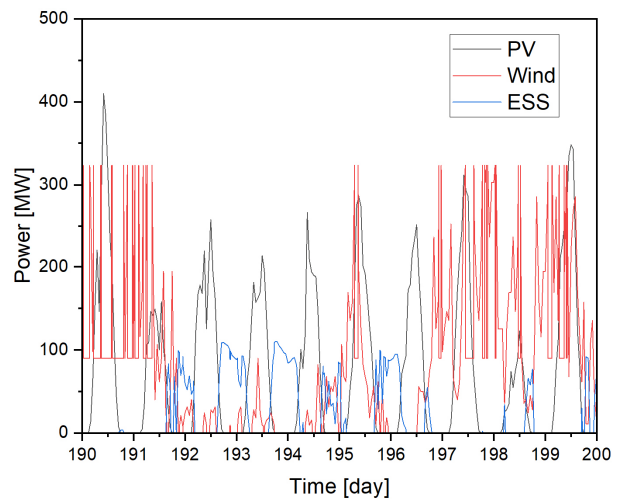


Fig. 21. Power supply by generation type (Case 2)

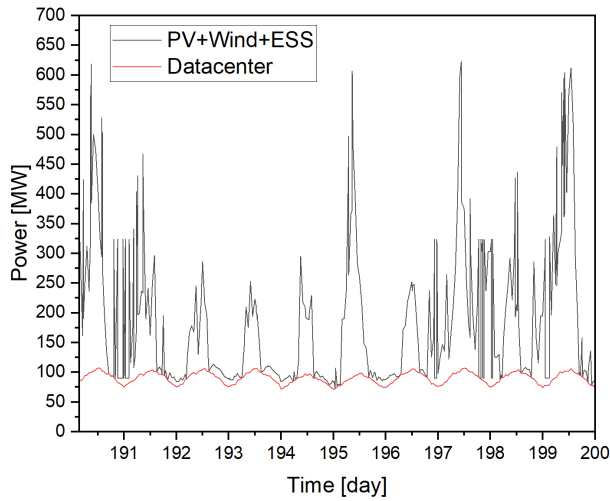


Fig. 22. Data center power supply using wind, solar, and ESS simultaneously

#### 4.5 원자력발전과 ESS를 이용한 데이터센터 전력 공급

100 MWe급의 SMR(Small Modular Reactor) 그리고 80 kW급(설계용량 205 kWh)의 ESS 300 대(24 MWe)를 연계하여 100 MW 규모의 데이터 센터의 전력수급을 평가하였다. 데이터센터 이용도, 기온, 일사량, 풍속은 앞 장에서 사용한 동일한 자료를 적용하였다. 원자력 발전소는 신·재생 에너지원과 달리 간헐성 없이 안정적으로 일정한 에너지를 공급할 수 있으며, 데이터센터 수요의 변동성으로 인하여 발생하는 부족한 전력은 ESS에서 보충할 수 있다. 본 분석 케이스에서 SMR을 이용하여 100 MW 규모의 데

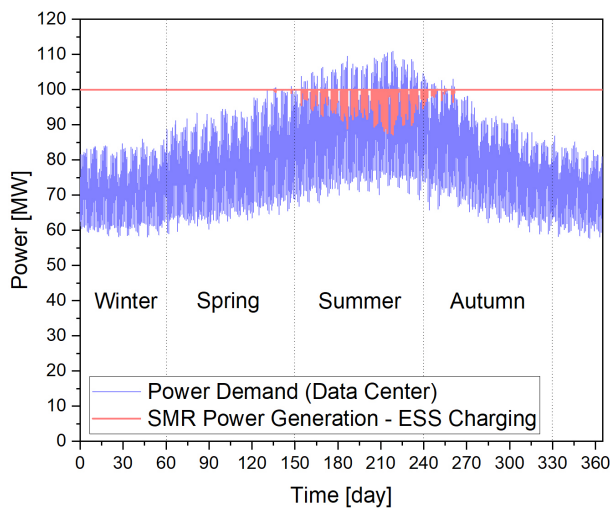


Fig. 23. Data center power supply using SMR and ESS

이터센터에 하절기를 제외하고 ESS 없이 데이터센터에 전력을 공급할 수 있다. Fig. 23에는 데이터센터의 전력수요와 ESS 충전을 제외한 SMR 발전량을 나타내었다. 주로 하절기에 데이터센터의 전력수요가 원전 규모인 100 MW를 초과하는 경우가 발생하는데, Fig. 24에서 확인할 수 있듯이 데이터센터의 전력 소비량이 100 MW 이상일 때에는 추가적으로 ESS를 사용하여 부족분의 전력을 공급할 수 있으며, 전력 소비량이 100 MW 이하일 때에는 SMR로부터 ESS를 충전하도록 하였다. 194~196일 구간에서 방전이 발생하지 않는데 해당 기간 동안 데이터센터의 전력수요가 발전량(100 MW)보다 낮아 원자력발전소만으로도 데이터센터의 전력을 공급할 수 있기 때문이다. Fig. 25는 시간대

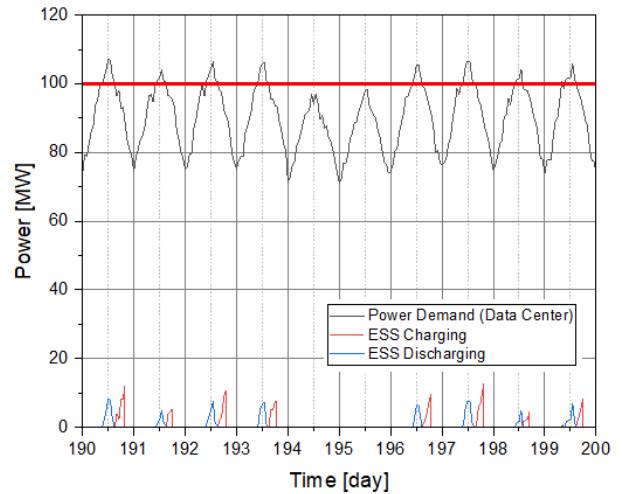


Fig. 24. Data center power supply using SMR and ESS (ESS Charging/Discharging)

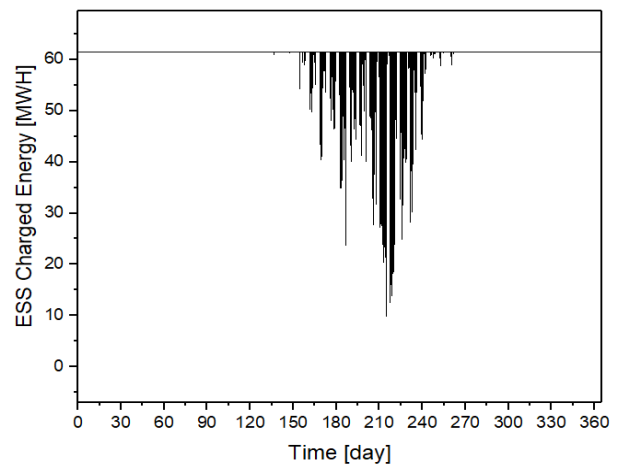


Fig. 25. Total ESS energy charged

별 ESS 충전량을 나타낸 것이다. 하절기에는 데이터센터의 전력 요구량이 가장 높아 ESS의 에너지 공급량이 증가하며, 이에 따라 총 충전량은 상대적으로 낮게 평가된다.

#### 4.6 원자력발전소 출력조정운전을 적용한 데이터센터 전력공급

원자력발전소 출력조정운전(Power Maneuvering Operation)은 원자로의 출력을 일정 범위 내에서 변화시키는 운전을 말한다. 원자력발전소는 기본적으로 기저부하 운전(Base Load Operation)에 최적화되어 있지만 전력 수요 변동 대응과 신·재생에너지 확대, 전력계통의 안정화의 이유로 출력조정운전이 요구되고 있다. 출력조정운전은 단기적으로 제어봉 조작, 장기적으로 붕소 농도 조절을 통해 수행되며, 본 연구에서는 제어봉 조작에 의한 일일 전력변화를 적용하였다.

130~170 MWe급의 SMR 제어봉 조작에 의한 출력조정운전을 적용하고 80 kW급(설계용량 205 kWh)의 ESS를 연계하여 100 MW 규모의 데이터센터의 전력수급을 평가하였다. 앞 절과 동일한 자료를 활용하고, 발전 규모 및 출력조정운전의 출력저하 범위에 따라 필요한 ESS의 수를 도출하였다(Table 3). SMR의 발전 규모가 작고, 출력저하범위가 낮은 경우에는 많은 ESS가 필요한 것으로 평가된다.

Fig. 26~29에는 SMR 출력조정운전과 데이터센터의 전력수요 및 ESS 충전량에 대해 나타내었다. 데이터센터의 전력수요가 높은 낮 시간에 SMR은 전출력으로 운전하고, 전력수요가 낮은 밤시간에는 저출력으로 운전하도록 하였으며, 데이터센터의 전력수요량이 가장 높은 하절기에 총 충전량이 낮게 유지되는 것을 확인하였다.

Table 3. ESS requirements based on SMR capacity and output

Case	Generation Capacity [MWe]	Output Range [%]	ESS Capacity [MWe]
1	130	30 ~ 100	136
2	150	30 ~ 100	104
3	170	30 ~ 100	88
4	130	50 ~ 100	48
5	150	50 ~ 100	16
6	170	50 ~ 100	0.1

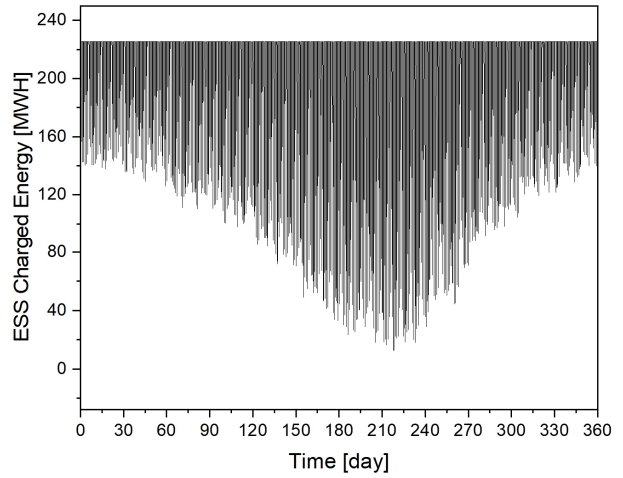


Fig. 26. Total ESS energy charged (Case 3)

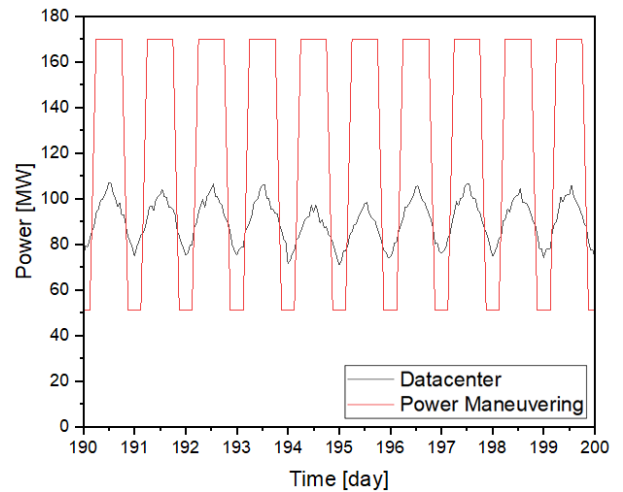


Fig. 27. Data center power supply using SMR power maneuvering operation and ESS (Case 3)

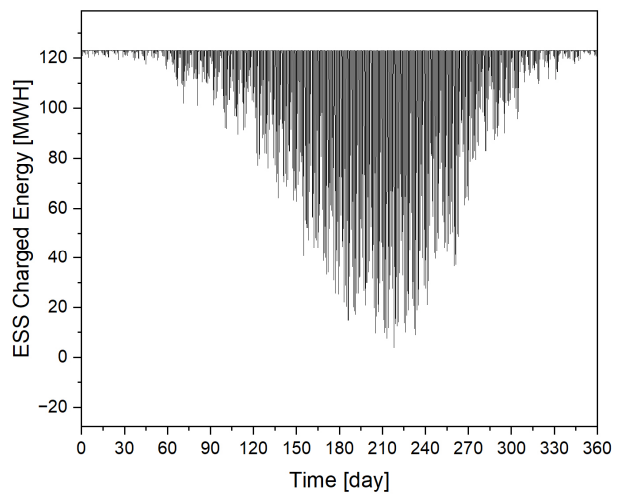


Fig. 28. Total ESS energy charged (Case 4)

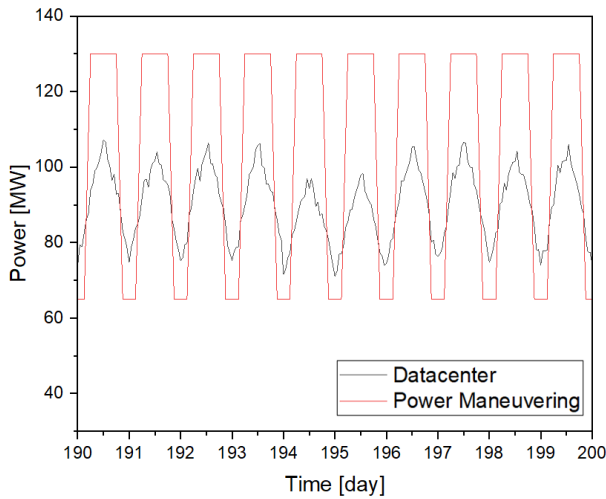


Fig. 29. Data center power supply using SMR power maneuvering operation and ESS (Case 4)

### 5. 결론

본 연구에서는 하이브리드 에너지 시스템의 모델링 및 분석의 일환으로 데이터센터 모델을 개발하고, 실제 데이터를 활용하여 풍력 및 태양광 발전을 통한 전력 수급 특성을 분석하였다. 데이터센터는 낮 시간대에 작업량 증가로 전력 수요가 상승하는 경향을 보였으며, 여름철에는 주변 온도 상승으로 냉각기에 소모되는 전력이 증가하여 총 전력 수요가 더욱 확대되는 것으로 나타났다.

태양광 발전은 일사량이 풍부한 낮 시간에 발전량이 증가하고, 야간에는 전력 생산이 이루어지지 않는 특성을 보였다. 풍력 발전은 낮 시간에 풍속 증가로 발전량이 증가하는 경향을 보였으며, 야간에도 일정 수준의 전력 생산이 가능하였다. 즉, 데이터센터의 전력 수요와 풍력·태양광 발전의 전력 생산이 모두 낮 시간에 집중되는 경향이 있어 전력 수급 측면에서 일정 부분 유리할 것으로 예상되었다.

그러나 데이터센터의 전력 수요 변동 폭은 태양광·풍력 발전의 전력 생산 변동 폭에 비해 상대적으로 작았으며, 동일한 설비 용량을 적용할 경우 전력 부족 시간이 전력 잉여 시간보다 더 많은 것으로 확인되었다. 이러한 전력 수요량과 발전량 간의 불일치를 해소하기 위해서는 출력 조절이 가능한 발전원이나 에너지 저장 장치(ESS)의 도입이 필수적임을 알 수 있었다. ESS를 통해 전력 수요량과 발전량 간의 불일치가 해소되었으나, 이를 위해서는 많은 수의 ESS

가 필요함을 확인하였다.

소형원자로(SMR)는 기저부하용 전력원으로서 안정적인 전력 공급이 가능하며, ESS는 전력 공급이 부족하거나 수요가 급증하는 피크 시간대에 보조 전력원으로 활용될 수 있음을 분석을 통해 확인하였다. 출력추종운전을 적용한 데이터센터 전력공급 시 발전 규모 및 출력과 ESS 요구량은 반비례함을 알 수 있었다. 또한 출력조정을 할 때 더 큰 규모의 원자력발전소(SMR)가 요구되는 것을 확인하였다.

Table 4는 100 MW 규모 AI 데이터 센터에 전력을 공급하기 위해 신·재생에너지와 원자력을 적용할 경우 필요한 발전설비 용량을 비교한 것이다. 신·재생에너지에 ESS를 병행할 경우 총 1,118 MW에서 1,548 MW의 발전설비가 요구되는 반면, 원자력 발전은 기저부하 운전 시 약 124 MW, 출력조정 운전 시에는 166 MW에서 266 MW의 설비용량이 필요한 것으로 분석되었다. 이는 신·재생에너지 출력의 간헐성으로 인해 대규모 ESS가 추가적으로 필요하며, 그 결과 원자력 발전에 비해 훨씬 큰 총 발전설비 용량이 요구됨을 보여준다.

본 연구에서 개발된 모듈들은 NRHES 및 IES의 다른 모듈들과 연계하여 다양한 구성, 설계 및 운영 방안을 분석하

Table 4. Power generation capacity required for supplying electricity to AI data centers (Renewable Energy vs. Nuclear Power)

New and Renewable Energy + ESS			
Wind [MWe]	Solar [MWe]	ESS [MWe]	Total Installed Capacity [MWe]
90	500	528	<b>1,118</b>
180	500	416	<b>1,096</b>
90	1,000	384	<b>1,474</b>
180	1,000	368	<b>1,548</b>
Nuclear + ESS			
Nuclear [MWe]	Output Range [%]	ESS [MWe]	Total Installed Capacity [MWe]
100	Base Load Operation(100)	24	<b>124</b>
130	30 ~ 100	136	<b>266</b>
150	30 ~ 100	104	<b>254</b>
170	30 ~ 100	88	<b>258</b>
130	50 ~ 100	48	<b>178</b>
150	50 ~ 100	16	<b>166</b>
170	50 ~ 100	0.1	<b>170.1</b>

는 데 활용할 수 있다. 특히 물리 모델의 매개변수를 조정함으로써 특정 설계나 제품을 모사할 수 있으며, 특정 지역의 실제 데이터를 입력값으로 적용함으로써 해당 지역의 특성을 반영한 고유한 분석 수행이 가능하다. 나아가 이러한 모듈은 향후 경제성 평가, 정책 수립, 운영 최적화 등의 분야로도 확장 적용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2025년도 정부(과기정통부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2025-02472969).

## References

- [1] International Energy Agency (IEA), 2022, "Data Centres and Data Transmission Networks", IEA, Paris.
- [2] REN21, 2023, "Renewables 2023 Global Status Report", REN21 Secretariat, Paris.
- [3] Hirth, L., 2013, "The market value of variable renewables", *Energy Economics*, **38**, 218-236.
- [4] World Nuclear Association (WNA), "Energy and the Environment", Accessed 19 September 2025, <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment>.
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 2012, "Load-Following and Flexible Operation of Nuclear Power Plants", NUREG/CR-7145, <https://snetp.eu/wp-content/uploads/2020/05/SNETP-Factsheet-7-Load-following-capabilities-of-nuclear-power-plants.pdf>.
- [6] Bragg-Sitton, S., Boardman, R.D., Rabiti, C., Kim, J.S., Mckellar, M.G., Sabharwall, P., Chen, J., Cetiner, S.M., Harrison, T.J., and Qualls, A.L., 2016, "Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan", INL/EXT-16-38165, Idaho National Laboratory, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1333006/>.
- [7] Ringkjøb, H.K., Haugan, P.M., and Solbrenke, I.M., 2018, "A Review of Modelling Tools for Energy and Electricity Systems with Large Shares of Variable Renewables", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **96**, 440-459.
- [8] Huber, M., 2016, "Flexibility in Power Systems – Requirements, Modeling, and Evaluation", M.S. thesis, Technical University of Munich, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1324033/1324033.pdf>.
- [9] Hall, L.M.H., and Buckley, A.R., 2016, "A Review of energy Systems Models in the UK: Prevalent Usage and Categorisation", *Appl. Energy*, **169**, 607-628.
- [10] Modelica Association, <https://modelica.org/>.
- [11] OpenModelica, <https://openmodelica.org/>.
- [12] Frick., K., Alfonsi, A., Rabiti, C., and Mikkelsen, M., 2022, Hybrid User Manual. United States, [https://indigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort\\_57481.pdf](https://indigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_57481.pdf).
- [13] Bang, Y.S., Kim. H.N., Cho, J.S., Kim, B.S., and Paik, C.Y., 2019, "A Study on Flexibility Modeling of Nuclear-Renewable Hybrid Energy System", Proc. 2019 Korean Nuclear Society Autumn Meeting, [https://www.kns.org/files/pre\\_paper/42/19A-261-방영석.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/42/19A-261-방영석.pdf).
- [14] Bang, Y.S., Cho, J.S., Yoo, J.S., Yoon, S.J., and Bragg-Sitton., S., 2019, "Review on Integration of Energy Storage System to Nuclear-Renewable Hybrid Energy System", Proc. 2019 Korean Nuclear Society Autumn Meeting, [https://www.kns.org/files/pre\\_paper/42/19A-259-방영석.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/42/19A-259-방영석.pdf).
- [15] Kim, K.Y., and Bang, Y.S., 2024, "Development and application of the helically coiled once-through steam generator module for dynamic simulation of nuclear hybrid energy system", *Nuclear Engineering and Technology*, **56**(8), 3315-3329.
- [16] FNC Technology Co., LTD., 2023, "Development of Design and Control Techniques for Korean Small Modular Nuclear-Renewable Hybrid Energy System".
- [17] Dayarathna, M., Wen, Y., and Fan, R., 2016, "Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **18**(1), 732-794.
- [18] Athavale, J., Yoda, M., and Joshi Y., 2018, "Thermal Modeling of Data Centers for Control and Energy Usage Optimization", *Adv.Heat Transf.*, **50**, 123-186.
- [19] Itoh, S., Kodama, Y., Nakamura, H., and Mori, N., 2010, "Power Consumption and Efficiency of Cooling in a Data Center", Proc. 11th IEEE/ACM International Conference on Grid Computing, <https://doi.org/10.1109/GRID.2010.5697800>.

- [20] Rasmussen, N., 2006, "Electrical Efficiency Modeling of Data Centers", White Paper #113, American Power Conversion, [https://www.biblioite.ethz.ch/downloads/nran-66ck3d\\_r1\\_en.pdf](https://www.biblioite.ethz.ch/downloads/nran-66ck3d_r1_en.pdf).
- [21] Rahmani, R., and Seydmahmoudian, M., 2017, "A Complete Model for Modular Simulation of Data Centre Power Load", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, **14**(8), <https://arxiv.org/pdf/1804.00703>.
- [22] SPECpwr\_ssj@2008 Benchmark, Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC), Accessed 28 September 2025, [https://www.spec.org/power\\_ssj2008/](https://www.spec.org/power_ssj2008/).
- [23] KMA Weather Data Service - Open MET Data Portal, Accessed 28 September 2025, <https://data.kma.go.kr/resources/html/en/aowdp.html>.
- [24] Lydia, M., Selvakumar, A.I., Kumar, S.S., and Kumar, G.E.P., 2013, "Advanced Algorithms for Wind Turbine Power Curve Modeling", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4**(3), 827-835.
- [25] Jeon, Y.J., 2002, "Modeling and Analysis of Wind Turbine Generating System at Haeng-Won in Jeju Island", M.S. thesis, Jeju National University, Jeju.
- [26] Ju, B.C., Shin, D.H., and Ko, K.N., 2016, "Accuracy Assessment of Annual Energy Production Estimated for Seongsan Wind Farm", *J. Korean Solar Energy Society*, **36**(2), 9-17.
- [27] Lee, J.W., Ko, K.K., and Lee, K.K., 2013, "The Effect of Power Generation Capacity and Wind Speed on the Efficiency of the Korean Wind Farms", *Korean Manag. Sci. Rev.*, **30**(2), 97-106.
- [28] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 2013, "Solar Engineering of Thermal Processes", 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [29] Green, M.A., 1982, "Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.