



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022 년 8 월

석사학위논문

가스터빈과 통합된 ESS 시스템
구현을 위한 수치해석 기반 Model-
in-the-loop 연구

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

권 오 창

가스터빈과 통합된 ESS 시스템
구현을 위한 수치해석 기반 Model-
in-the-loop 연구

Model-in-the-loop simulation based on numerical study for
ESS integrated gas turbine system

2022년 08월 26일

조선대학교 대학원

기계공학과

권오창

가스터빈과 통합된 ESS 시스템
구현을 위한 수치해석 기반 Model-
in-the-loop 연구

지도교수 박 정 수

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 4월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

권 오 창

권오창의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조 흥 현 印

위 원 조선대학교 교수 오 동 욱 印

위 원 조선대학교 교수 박 정 수 印

2022년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

CONTENTS	i
LIST OF FIGURES	v
LIST OF TABLES	vii
DEFINITIONS & NOMENCLATURE	vii
ABSTRACT	x

CHAPTER 1. INTRODUCTION

1.1 Research background	1
1.1.1 Sustainable development	4
1.1.2 Duck curve	6
1.1.3 Waste battery	8
1.2 Research trends	10
1.2.1 Micro gas turbine	10

1.2.2 Energy storage system 12

1.2.3 Reuse & recycle battery 15

1.3 Research objective 17

CHAPTER 2. METHODOLOGY

2.1 Modeling overview20

2.1.1 ESS Integrated Gas Turbine system model description..... 22

2.1.2 EIGT simulation model 23

2.2 Micro gas turbine modeling 25

2.3 Battery modeling 30

2.3.1 Lumped Battery rack model 31

2.4 Battery experiment & simulation setup 32

2.4.1 Battery experiment conditions 32

2.4.2 Battery experiment procedure 32

2.5 AutoLion 1-D simulation model 35

2.5.1 Battery model calibration 35

2.5.2 Battery Aging model by drive cycle 36

2.6 Design of Experiment & Single-objective Pareto optimization
..... 37

2.6.1 DOE and Single-objective Pareto optimization 37

CHAPTER 3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Turndown operation mode39

3.2 Optimization & aging of battery model43

**3.3 Reuse battery vs Reference new battery performance
comparison**
.....47

3.4 Compensation of the duck curve with EIGT 50

CHAPTER 4. CONCLUSIONS & FUTURE WORK .. 51

REFERENCES 55

LIST OF FIGURES

Figure 1 Forecasting fossil fuel and clean energy usage	5
Figure 2 Smart grid-based distributed power supply.....	5
Figure 3 Steep ramping needs and overgeneration risk shown on the duck curve	7
Figure 4 Global lithium secondary battery market forecast.....	9
Figure 5 Estimated number of waste batteries from EVs.....	9
Figure 6 Energy storage system (ESS) configuration diagram	14
Figure 7 Large-scale battery storage power capacity in the United States.....	14
Figure 8 Battery life in a circular economy perspective	16
Figure 9 Schematic diagram of research objective	19
Figure 10 Overall research flow.....	21
Figure 11 Schematic of EIGT 1-D simulation model.....	22
Figure 12 Schematic of EIGT in GT-SUITE.....	23
Figure 13 Schematic of micro gas turbine model.....	25
Figure 14 Schematic of Micro gas turbine in GT-SUITE	26
Figure 15 TIT and shaft speed versus Load_pressure.....	26

Figure 16 Cylindrical battery cells used in the experiment 33

Figure 17 (a) Battery experiment set up, (b) Battery charge/discharge test
procedure 34

Figure 18 Battery 1-D simulation model in the GT-Autolion 35

Figure 19 Battery drive aging 1-D simulation model in the AutoLion 36

Figure 20 Performance map for (a) compressor, (b) turbine at each operating point
..... 39

Figure 21 Turndown operation mode in EIGT model 42

Figure 22 Pareto design point according to optimization by battery type..... 43

Figure 23 Optimization curve fitting by battery type 44

Figure 24 (a) capacity loss (b) SOH by battery type according to driving cycle
aging 46

Figure 25 Changes of reused and reference new batteries by battery type 49

Figure 26 Compensation for duck curve using EIGT system..... 50

LIST OF TABLES

Table 1. Main performance parameters of the gas turbine combustor at 4.5bar.	24
Table 2. Cylindrical cell series and parallel number	31
Table 3. Sampling ranges for single-objective Pareto optimization	33
Table 4. Battery specification and operation	38
Table 5. Aging capacity and SOH by battery type	45

DEFINITIONS & NOMENCLATURE

Abbreviation

AC	Alternating current
CCHP	Combined cooling, heating, and power
CLP	Combustion loading parameter
CI	Combustion intensity

CV	Constant voltage
CC	Constant current
DC	Direct current
DoE	Design of experiment
ESS	Energy storage system
EIGT	ESS integrated gas turbine
EV	Electric vehicle
HEV	Hybrid electric vehicle
LCA	Life cycle assessment
LHV	Lower heating value
NEDC	New European driving cycle
PPM	Parts per million
RMS	Root mean square
RPM	Revolutions per minute
SOH	State of health
SOC	State of charge
TIT	Turbine inlet temperature
V2G	Vehicle to grid

Nomenclature

C	Specific capacitance
c_e	Li^+ Concentration in the electrolyte
c_s	Li^+ Concentration in the solid
D_e^{eff}	Electrolyte phase Li Diffusion coefficient
ε	Porosity
F	Faraday's constant
j^{Li}	Reaction current of Li
k^{eff}	Electrolyte effective ionic conductivity
k_D^{eff}	Effective diffusional conductivity
r	Particle radius
x	Distance in the thru-plane direction
σ_s	Solid phase conductivity
ϕ_s	Solid phase Potential
ϕ_e	Liquid phase potential

ABSTRACT

Model-in-the-loop simulation based on numerical study for ESS integrated gas turbine system

OCHANG KWON

Advisor: Prof. JUNGSOO ARK, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

The global effort for carbon neutrality has led to a change in the energy paradigm, renewable energy is one of the most popular energy sources. However, as the proportion of renewable energy increases, demand uncertainties such as a sharp drop in net load between sunrise and sunset and a surge in output for about 3 hours from just before sunset to early evening are intensifying.

In this study, the ESS Integrated Gas Turbine system, which combines the Micro gas turbine (MGT) and the Energy storage system (ESS), can be modeled 1-D to compensate for the rapid power demand for about 3 hours from just before sunset to early evening in the duck curve phenomenon. In addition, in consideration of the utility with a new battery in the ESS along with the growth of the Reused-battery market, the battery performance is checked when the second-life battery is reused in the ESS. For simulating the Reused-battery, SOH 80% was simulated by cycling the NEDC operation mode based on the battery life of about 10 years (3650 cycles). The SOH, SOC, internal resistance, temperature, heat generation rate, etc. of Reused battery were

confirmed through application to the ESS integrated gas turbine (EIGT) model. In addition, EIGT's operation strategy, Turndown operation mode, was used to supply power suitable for the power demand. As a result, the duct curve phenomenon was compensated by supplying about 66% more power after sunset through the surplus power stored in the existing ESS.

CHAPTER 1. INTRODUCTION

1.1 Research background

세계적으로 기후변화, 환경오염과 관련한 심각한 문제는 탄소중립 및 온실가스 감축을 위한 에너지 패러다임의 변화를 이끌었다. 이로 인해 신재생에너지가 각광 받으면서 발전 비중을 점차 높이며 시장을 확대해 나가고 있다. 하지만 이러한 변화들은 또 다른 문제들을 야기한다. 신재생에너지는 기후나 시간대에 대한 영향을 많이 받으므로 전력 수급이 안정적이지 못한 단점이 있다. 또한 불규칙한 전력 생산으로 인해 예측이 어려워 과잉 및 잉여전력이 발생하게 되는 덕 커브 현상이 심화되고 있다[1]. 문제를 해결할 기술로 에너지 저장 장치인 ESS(Energy storage system)를 활용하였다.

ESS는 일반적으로 전력 수요가 적을 때 혹은 전력 단가가 낮을 때 에너지를 저장하고, 전력 수요가 많은 피크 부하 시간에 저장된 에너지를 방출하여 피크전력을 저감한다. 또한 신재생 발전기의 출력 변동 흡수, 전력 계통 안정화를 위한 주파수 제어, vehicle to grid(V2G)등에 폭넓게 적용되고 있다[2-4]. 이를 통해 신재생에너지와 ESS를 결합하여 신재생 에너지의 간헐성과 덕 커브 현상을 어느정도 완화하는 결과를 보여주었다[5-6]. 하지만 대규모 정전사태와 같이 실시간으로 전력 수요가 급한 상황에서의 신재생에너지는 기후에 영향을 많이 받기 때문에 안정적으로 전력을 공급하지 못하는 단점이 있다. 또한 효율적인 전력 송전 및 대규모 정전사태에 대비하여 발전형태도 집중형보다 분산형으로 변화하고 있으며, 분산형 에너지 시스템으로 전환은 전력 공급의 유연성을 확대시켜줄 뿐만 아니라 전력 공급시의 손실을 줄여 효율성을 극대화할 수 있다는 장점을 가지고 있다[7].

가스터빈은 수요에 맞는 안정적인 전력 공급, 높은 에너지 밀도 그리고 부하운전에 따른 빠른 응답성을 가지고 있다[8-11]. 기존의 석탄 화력발전에서 천연가스 발전으로의 전환을 통해 탄소배출 및 유해가스 배출에 관한 문제를 해결하고 있다. 또한 연료의 유연성이 뛰어나기 때문에 향후 천연가스에 수소를 혼합하여 연료로 사용 가능하다. 태양광 발전과 풍력발전의 간헐적인 특성을 보완하고, 재생에너지 확대를 위한 가스터빈 기술은 중요한 가교역할을 할 것이라 기대된다. 가스터빈과 에너지저장장치를 결합하는 하이브리드 형태의 여러 연구들이 진행되어왔다. Ian Beil [12]는 에너지 저장 장치를 black start 발전원으로서 전력을 공급하고 시스템의 부하로 전원을 복구하는 연구를 하였다. Jing Qiu et al. [13]는 가스터빈과 태양광 발전, 배터리 에너지 저장 시스템을 혼합하여 에너지 그리드에 사용할 수 있는 공식화된 모델을 제시하여 시뮬레이션 하였다. Xushen Wang et al. [14]은 태양광 및 압축 공기 에너지 저장소와 결합된 CCHP 시스템을 통해 전기 부하 균형을 맞추어 에너지 효율을 개선하였다. S.Saib et al. [15]은 태양광, 풍력, 가스터빈, 배터리 에너지 저장장치 등 여러 에너지를 알고리즘 최적화를 통한 하이브리드 시스템을 설계하였다. 그 결과 총 시스템 비용과 배출 감소의 결과를 보여주었다. 하지만 선행 연구들은 신재생에너지 및 전체 시스템의 효율 개선을 위한 연구를 수행하였으며, 실시간 송전 수요를 만족하는 연구로서는 한계가 있다. 또한 ESS 배터리를 신제품으로 사용했을 때의 경제적 효용가치가 떨어지는 점과 점차 증가하는 폐배터리의 활용을 위한 재사용의 필요성이 대두되고 있다. 이와 관련한 연구로 Leila Ahmadi et al. [16-17]는 EV에 사용되는 배터리를 수명 주기 평가(LCA) 기법과 용량 페이드 분석을 통해 ESS에 재사용 하기 위한 배터리 핵심 매개변수 관련 민감도 분석을 제시하였다. 이를 통해 폐배터리의 용도 변경과 ESS에 적용의 타당성 및 가능성을 보여주었다. Akhil Garg et al. [18]은 폐기된 배터리 팩의 수

집, 분해와 배터리 SOH를 감지 및 분류하여 재사용 할 수 있도록 하였으며, 그 결과 배터리의 용량 및 장애 사이클 수의 증가를 보여주었다. 선행 연구들은 배터리 시스템 모델에 적용하지 않은 개별 배터리 셀과 팩에 중점을 두어 연구를 하였기 때문에 실제 시스템에서의 결과를 바라보기엔 부족한 점이 있다. 따라서 본 저자는 가스터빈과 ESS를 결합한 시스템에 직접 적용하여 좀 더 넓은 시각으로 바로 볼 수 있으며, 수치 해석적인 연구를 통해 시간적으로나 비용적으로 효율적인 연구를 수행하였다.

1.1.1 Sustainable development

세계적으로 탄소중립(Net Zero)을 위해 환경에 관심이 커짐에 따라 지속가능한 발전이 중요한 목표로 인식되고 있다. 1987년 세계 환경 발전위원회(World Commission on Environment and Development, WCED)는 “우리공동의 미래”라는 보고서[19]를 통해 지속가능한 발전이라는 개념을 다음과 같이 정의하였다. 지속가능한 발전이란 ‘미래 세대의 요구를 충족시킬 수 있는 능력을 위태롭게 하지 않으면서 현 세대의 욕구를 충족시키는 발전’을 말한다. 기후변화는 가능한 변화를 방해하는 가장 큰 요인이며, 온실가스 및 탄소 중립을 통해 에너지 시스템 전환과 청정 및 효율이 높은 에너지 기술의 필요성이 커지고 있다. 이에 따라 화석연료와 원자력 에너지 사용량을 줄이고 신재생에너지의 발전 비중을 점차 확대하는 에너지 믹스 형태로 변화되고 있다.[20]

전력 계통 또한 기존의 석탄발전소와 같은 대규모 발전소에서 신재생에너지 기반 소규모 분산형 시스템으로 변화를 준비하고 있다. 분산형 전원의 장점으로는 광역적인 정전사태를 일으킬 수 있는 기존의 중앙집중형 전력 공급 시스템과 다르게 국지적으로 이루어지며, 다른 분산 전원을 활용할 수 있어 전력 계통의 안전성을 높일 수 있다. 또한 송·배전망을 신규로 건설하기 위해 투입되는 인프라 건축비용과 장거리 송전시 발생하는 에너지 손실인 운영비용을 크게 절감할 수 있으며, 전원이 소규모로 분산돼 있기 때문에 중앙집중적인 전원시스템보다 전력을 더 안정적으로 공급할 수 있다. [21]

이렇듯 신재생에너지 기반 분산형 전원의 비중 확대에 대한 필요성이 커짐에 따

라 지속가능한 발전을 위한 노력들이 이루어지고 있다.

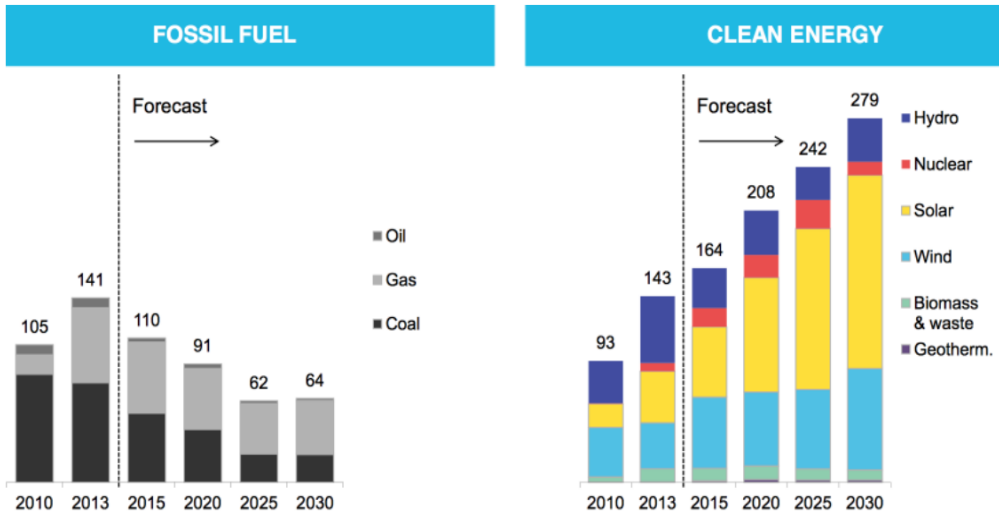


Figure 1. Forecasting fossil fuel and clean energy usage

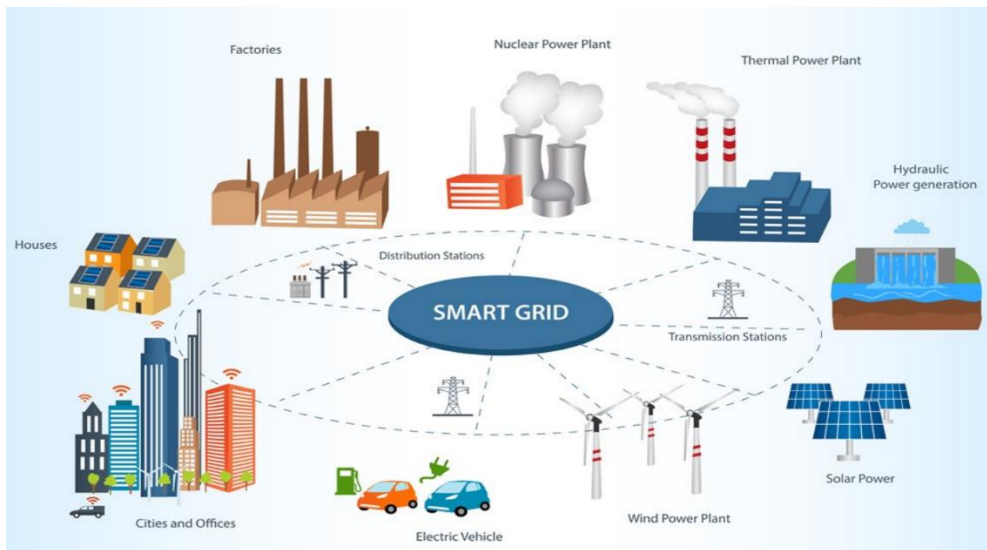


Figure 2. Smart grid-based distributed power supply

1.1.2 Duck curve

신재생에너지 발전 비중의 확대는 덕 커브(Duck Curve) 현상을 야기하였다. 이는 캘리포니아 계통운영기구인 CAISO에 의해 명명되었으며, 신재생에너지 발전 분야에서 특히 태양광 발전에서 많이 발생하는 현상으로 일출과 일몰이후의 순 부하 차이에 따라 나타나는 오리모양의 부하곡선 형태를 가진다. 덕 커브 모양에서도 나타나듯 일몰 이후 태양광 발전을 통한 전력생산을 하지 못하게 되면 전력 수급에 공백이 생겨 급격한 전력 수요 문제가 발생하게 된다. 신재생 에너지 발전 비중 확대 이전에는 일출과 일몰 전 후로 하루 2회 소폭 상승 및 하강하는 ‘카멜 커브(Carmel Curve)’의 형태를 보이며 예측가능한 전력수요를 보였다. 하지만 신재생에너지 발전 비중을 확대함에 따라 낮 시간대의 대부분의 발전량을 태양광 발전이 담당하면서 일출과 일몰 전후의 순 부하량 차이에 따른 전력 수요 불확실성이 증가하여 전력망의 불안정성의 문제에 노출되었다.

기존의 전력 생산을 담당하던 기저전원인 석탄, 원자력 등의 부하수준까지 점유하게 된다면, 일출과 일몰 전후 전력 수요에 맞는 부하 충당을 위해 기저전원을 운전함에 따라 발생하는 운영비용의 부담이 가중된다. 또한 안전 문제와 배출가스 규제로 인한 기존의 기저전원인 원전, 석탄발전소 등의 폐쇄와 신재생에너지 비중의 확대가 동시에 발생되는데, 만약 여름철 폭염으로 인한 급격한 전력 수요, 겨울철 혹한으로 인한 재생에너지를 통한 발전이 불가한 상황에서 대응하지 못한다면 대규모 정전이 발생할 가능성도 있다. 따라서 덕 커브 현상은

신재생에너지 발전비중 확대에 따라 필연적으로 보완해야 하며 전력계통 불안정성을 해결해야 하는 문제를 야기한다.

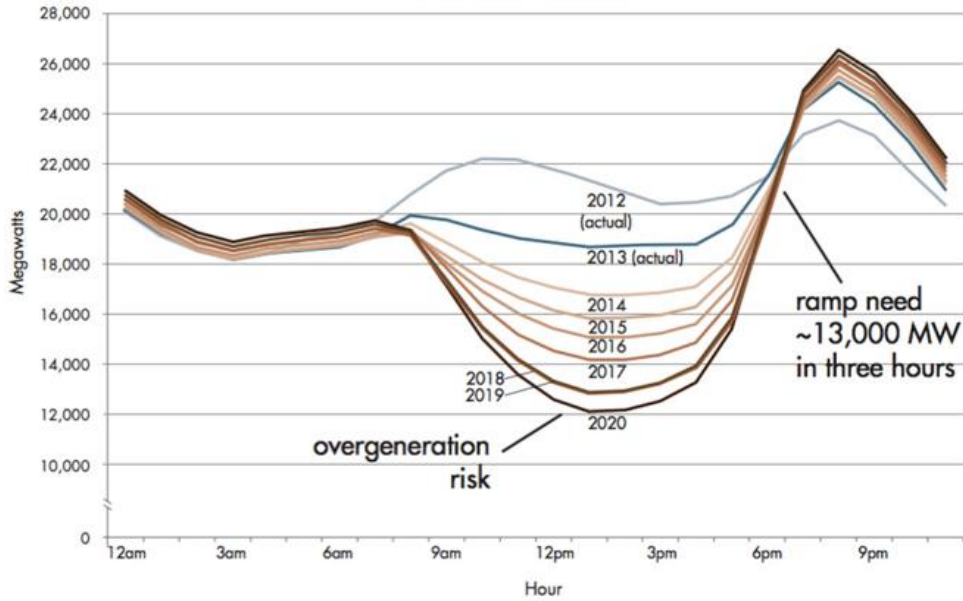


Figure 3. Steep ramping needs and overgeneration risk shown on the duck curve

1.1.3 Waste battery

최근 친환경 및 탄소중립을 달성하기 위한 전기자동차(EV, Electric Vehicle), 드론, 에너지저장시스템(ESS) 등의 발달로 인해 총방전이 가능하며 에너지 효율성이 좋은 리튬 이차전지의 중요성 및 생산량이 증가하고 있다. SNE Research 보고서[22]에 따르면 리튬 이차전지 시장은 점차 성장하여 2030년 리튬이온 이차전지 시장 총 수요량이 3392GWh을 전망하고 있으며 이는 2019년 기준 수요량 대비 약 17배 성장할 것이라 예측하였다.

현재 리튬이차전지의 가장 큰 수요처는 전기자동차(EV)이다. 이러한 이유는 매년 발생을 통해 기후변화에 영향을 많이 끼치는 내연기관 자동차의 환경문제를 해결할 수 있는 방법이기 때문에 전기차 보급이 확대되고 있는 것으로 판단된다. 글로벌 시장 조사 기관들은 내년부터 초기 세대 EV의 대량의 폐배터리가 배출될 것으로 예측하고 있다. 이에 따라 2030년까지 연간 150GWh 이상의 폐배터리가 전 세계적으로 배출될 것으로 예상된다. 한국에너지경제연구원은 또한 2029년까지 국내 EV 폐배터리의 방전이 약 8만 세트에 이를 것으로 예측하고 있다. 따라서 국내외 시장조사기관들은 EV 시장이 확대됨에 따라 매년 배출되는 폐배터리 수가 기하급수적으로 증가할 것으로 예측하고 있다. 소형 전지의 경우 전동공구 및 E-모빌리티 등과 같은 IT이외의 수요처가 발생하며 새로운 시장성장이 예상되며, 그 규모는 약 123GWh로 추정된다.

성장하는 리튬이차전지 산업에 비례하여 폐배터리 산업 또한 확대될 것으로 예

상하고 있다. 하지만 폐배터리를 활용하는 방안 및 절차에 대해서는 명확한 규정이 없는 상태이다. 따라서 이에 대한 방안이 필요하며, 이와 더불어 폐배터리 활용방안에 대한 노력이 필요하다.

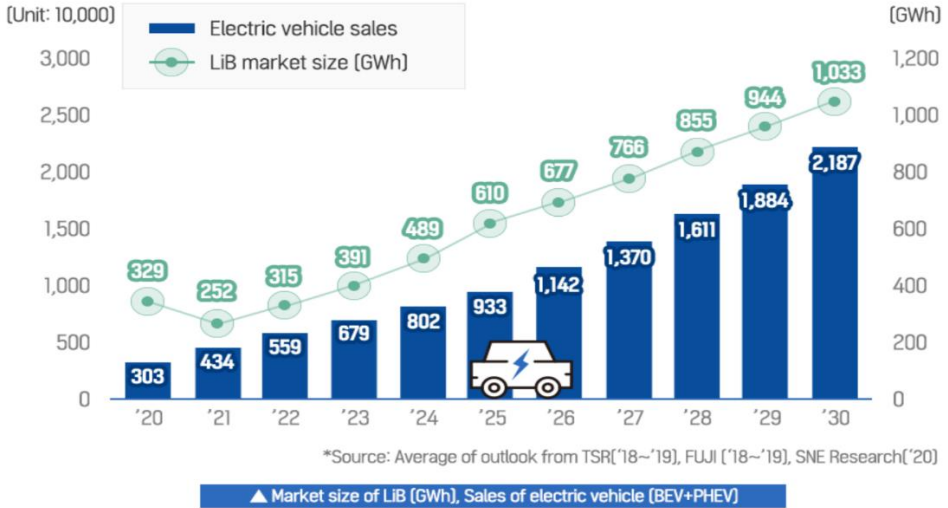


Figure 4. Global lithium secondary battery market forecast

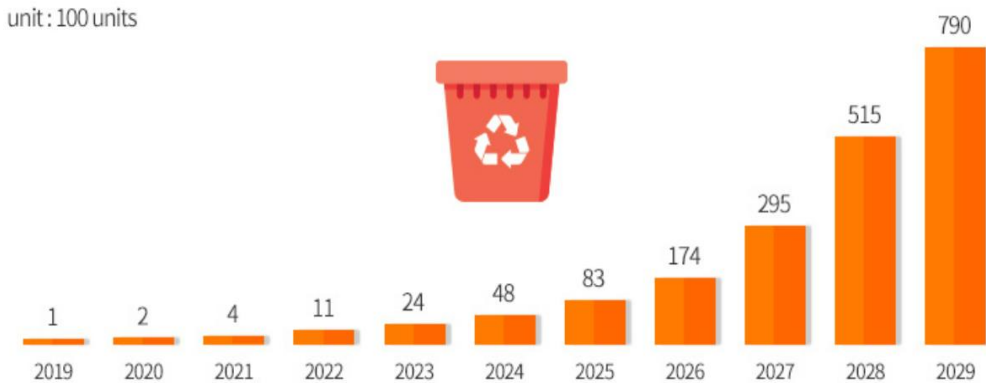


Figure 5. Estimated number of waste batteries from EVs

1.2 Research trends

1.2.1 Micro gas turbine & distributed generation

전기에너지의 수요증가에 따라서 분산발전원의 필요성이 대두되고 있다. 그중 마이크로 가스터빈(MGT, Micro Gas Turbine)을 통한 발전형태는 기존 가스터빈에 비해 소형이라는 장점을 가지고 있으며, 소음과 진동이 적고 유해가스 배출 저감 성능이 우수하여 자동차 산업이나 주택용으로써 마이크로 가스터빈을 이용한 발전 시스템에 대한 연구도 활발히 진행중이다.

기존의 대형발전설비 중심 전력 수급 시스템은 막대한 초기 투자비용을 필요로 하며, 발전단가가 고가이다. 또한 전력수요 변동에 즉각적인 대응을 할 수 없으며, 정전 시 대체전원을 공급하기 어려운 문제가 있다. 이에 비해 분산발전을 이용하는 경우, 초기 투자비용이 적게 들고 설치기간이 짧기 때문에 전력 수요에 탄력적으로 대응이 가능하며 송전 손실을 최소화할 수 있다.[23-24] 특히 마이크로 가스터빈은 구조가 단순하여 유지보수가 편리하며, 우수한 기동성을 통한 전력 수요 변동에 실시간으로 대응 할 수 있으며, 신재생에너지에 비해 전력 품질이 좋다. 또한 기존의 대규모 석탄발전소와 달리 청정연소 구현 등의 장점을 가지고 있어서 분산 발전 시스템에 적합한 발전원으로 평가받고 있다. 최근에는 신재생에너지와 분산전원을 활용한 하이브리드 형태의 발전시스템 관련 연구가 활발히 진행중이다. 분산전원을 통해 기존의 기저전원과 신재생에너지 사이의 가교 역할을 할 수 있으며, 불안정한 전력 수급을 기동성이 좋은 분산전원을 통해 대응하여 시너지 효과

를 낼 수 있다. 마이크로 가스터빈은 향후 재생 열교환기의 도입으로 인한 효율을 높이는 방법과 수소와 같은 배출가스가 없는 연료종을 사용한다면 보다 청정하며 높은 효율로 분산형 발전 시스템의 핵심역할을 담당하며, 활용분야가 지속적으로 확대될 것이다.

1.2.2 Energy storage system

신재생에너지 비중의 확대에 따라 급변하는 기후에 따른 전력 수급의 불균형에 대한 문제가 발생하고 있다. 특히 날씨 및 기후에 영향을 많이 받는 신재생에너지 발전의 특성상 전력 수요/공급량을 예측하기 어려워 전력계통의 불안전성을 야기시킨다. 이에 대응하기 위해서 과잉발전되는 전력량을 저장하고, 전력이 필요할 때 공급하여 전체 전력 사용 효율을 높이는 에너지 저장 시스템(Energy storage system, ESS)를 활용하고 있다. [25-26]

ESS는 에너지 저장방식에 따라 배터리 방식(리튬(Li)전지, 나트륨 황(NaS)전지, 레독스 흐름 전지, 슈퍼 캐패시터 등) 비 배터리 방식(양수발전, 압축공기저장, 플라이휠 등)으로 구분된다. 일반적인 ESS 전체적인 구성은 아래 그림과 같다. ESS는 크게 배터리, 전력변환장치(Power conversion system, PCS), 전력 관리 시스템(Energy Management system, EMS) 등의 시스템으로 구성되어 있다. 배터리는 전력을 저장하는 역할을 하며, PCS는 전력을 입력 받아 배터리에 저장 또는 송전을 위한 교류와 직류의 전기적 특성 변환 역할을 한다. EMS는 배터리 및 시스템에 대한 제어 및 모니터링이 가능한 시스템으로 ESS를 보다 효율적으로 운영할 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 점차 전력수요가 증가함에 따라 발전소와 변전소 등 전력공급 안정화를 위한 대용량 에너지 저장장치의 수요가 크게 증가할 것이라 예상된다. [27-28] 실제로 Energy information administration의 보고서에 따르면 2020년 미국의 대용량 에너지 저장용량은 1650MW로 약 35% 증가하였으며, 지난 5년동안 3배 이상이 증가하였다. 에너지 저장기술은 에너지 산업 분야에서 세계시

장을 선도할 중요한 기술로서 전력 저장기술의 수요가 지속해서 확대될 것으로 예상된다.

또한 신재생에너지원의 출력 불균형 완화 및 전력 품질 문제 해결을 위한 대안으로 ESS 연계기술이 대두되었다. 신재생에너지와 ESS 연계기술로는 주파수 조정 (Frequency Regulation), 피크저감 (Peak Shaving), 신재생에너지 발전출력 안정, 부하평준화 (Load Leveling), 비상전원 등의 기능으로 사용된다. [29] 주로 태양광이나 풍력에 많이 사용되며, 에너지 효율 극대화 및 계통 안정화를 추구한다. [30] 최근에는 소규모 단위의 전력망인 마이크로 그리드에서의 여러 분산전원에 연계가능한 ESS 역할과 중요성이 확대되고 있다. 분산에너지와의 연계를 위해선 HESS(Hybrid Energy storage systems)를 통해 넓은 주파수 스펙트럼을 만족시켜야 하며, 마이크로 그리드에서의 분산전원과 ESS의 연계를 위한 연구들이 진행 중이다. [31]

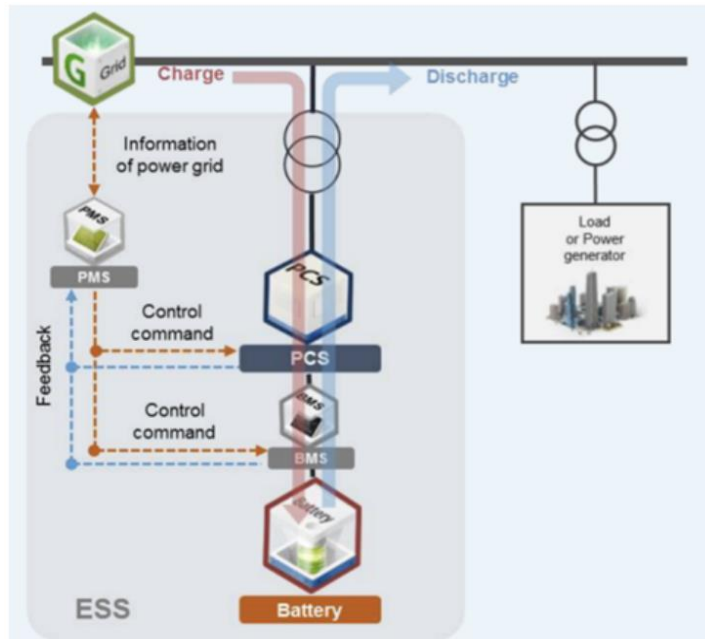


Figure 6. Energy storage system (ESS) configuration diagram

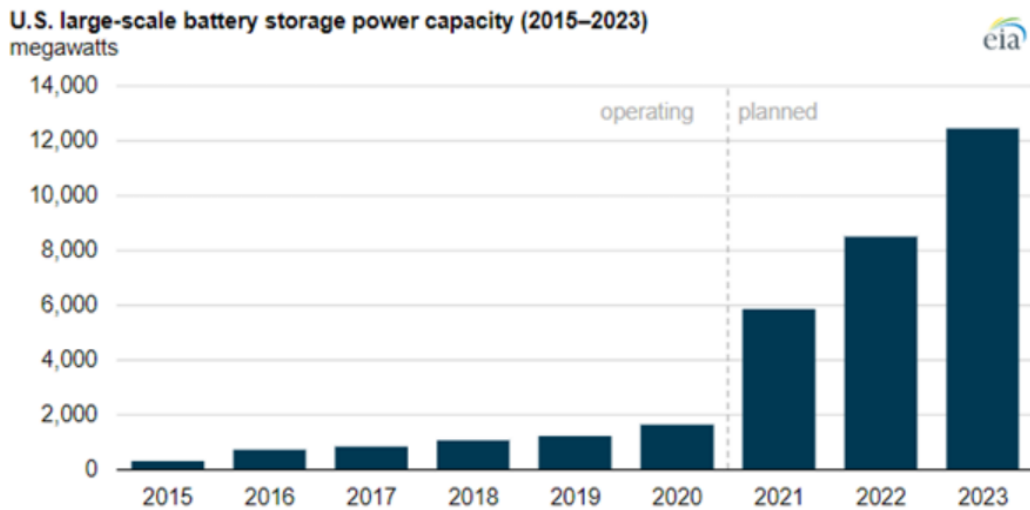


Figure 7. Large-scale battery storage power capacity in the United States

1.2.3. Reuse & recycle battery

탄소중립을 위해 화석연료를 사용하는 내연기관을 줄이고 배터리를 사용하는 전기차의 사용이 확대되고 있다. 하지만 배터리는 소모품이기 때문에 대부분 전기자동차의 배터리 용량은 초기 대비 70% 이하로 감소하면 총 방전 시간, 주행거리 등의 문제로 교체가 필요하다. [32-33] 이처럼 전기차의 증가에 따라 발생하는 폐배터리의 환경적인 영향이 대두되고 있다. 배터리 생산과 폐기를 하는데 발생하는 온실가스 감축을 위해 생산-소비-폐기를 생산-소비-재생의 형태로의 배터리 재사용, 자원의 재활용을 하여 순환경제를 통해 탄소 배출량을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. [34-36]

폐배터리를 활용하는 방법으로는 크게 두가지가 있다. 배터리 Re-Cycling은 양극 활물질로부터 고가의 희유금속을 추출하는 것으로서, 보통 소형 IT 기기용 폐전지에서 활용되고 있다. [37] Re-Cycling 과정으로는 폐배터리가 입고가 되면 방전 시킨후 파쇄하여 종류별로 분류 및 추출하게 된다. 또 다른 방법으로는 배터리 Re-use 과정으로 폐배터리가 입고되면 배터리 팩을 모듈 단위로 분해하여 분석한 후 재사용 가능한지에 대한 평가와 등급 분류를 하여 재사용하는 과정을 거치게 된다. [38] 초기 용량 대비 70% 이하로 성능이 저하된 배터리는 재사용하여도 가속 및 급제동과 같은 고출력, hard한 구동환경을 요구하는 전기차에는 재사용하기 부적합하다. 하지만 잔존용량을 활용하여 구동 환경이 가혹하지 않은 ESS에 Re-Use하면 최대 10년을 더 사용할 수 있으며, 배터리를 생산함에 따라 필요한 재료 및 생산 비용이 줄고, 발생시 생성되는 온실가스 또한 감소된다. 이러한 효용성이 가치

를 인정받아 국내외 다수의 기업들이 실증 및 연구 개발 중이다. [39]

이처럼 전동화시대에 맞춰 급격하게 증가하는 폐배터리를 활용하는 여러 방법들이 진행 중이며, 전기차 산업의 성장과 함께 필연적으로 공존하는 산업인 만큼 폐배터리 시장에 대한 관심이 필요하다.

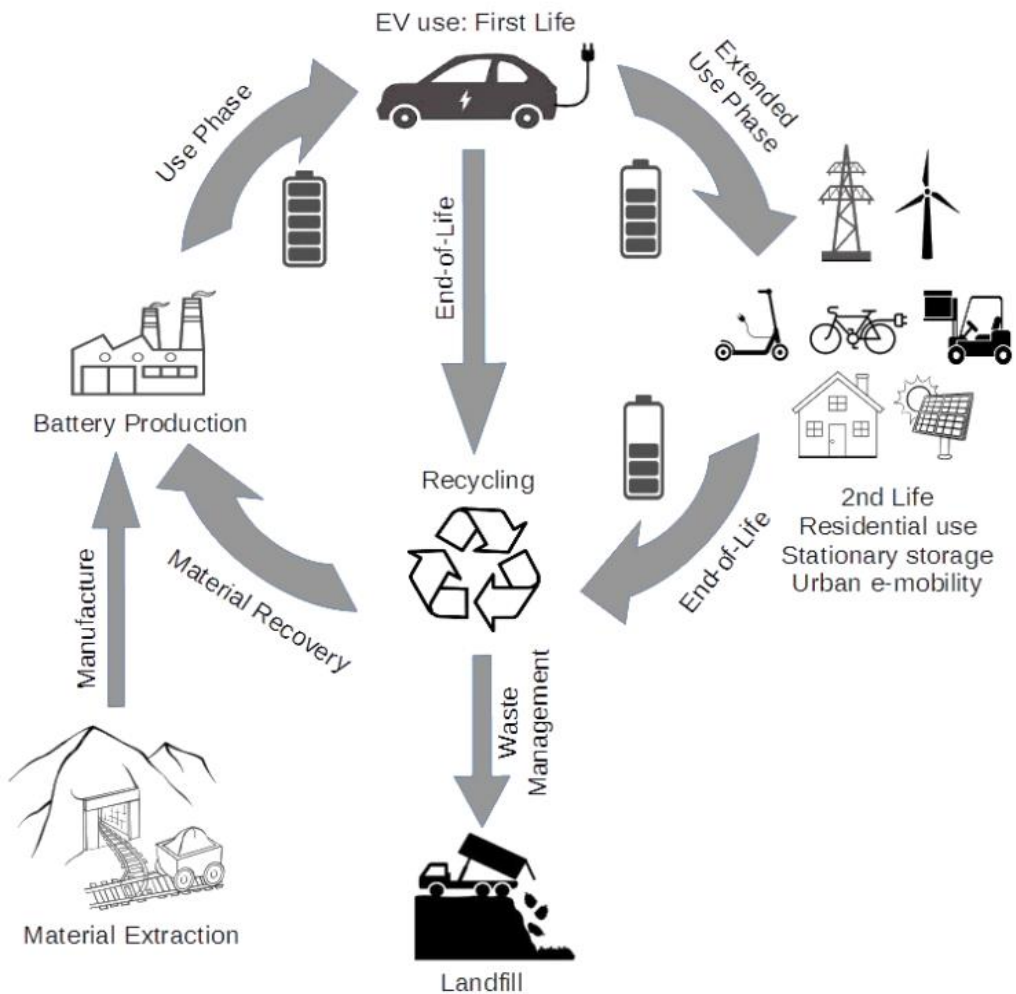


Figure 8. Battery life in a circular economy perspective

1.3 Research objectives

Figure 9는 본 연구의 전체적인 흐름을 나타낸다. 세계적으로 탄소중립을 목표로 배출가스 규제와 온실가스 감축을 위해 산업계 여러 분야에서 노력 중이다. 특히 생활과 밀접한 전력생산을 담당하는 발전분야와 수송분야에서의 전환이 두드러진다.

우선 발전분야에서는 석탄화력 발전에서 신재생에너지 발전으로의 전환을 통한 발전 비중 확대가 추진 중이다. 하지만 지역, 기후, 시간대에 영향을 많이 받는 신재생에너지 발전의 특성상 나타나는 출력 불균형으로 인한 덕 커브 현상과 낮은 전력 품질 같은 문제들이 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 ESS를 결합하여 재생에너지로부터 발생하는 전력을 저장하여 수요가 생길 때 사용하며, 주파수 조정을 통하여 불균형 문제를 해결하고자 하였다. 하지만 ESS는 발전원이 아닌 저장 매체로서 발전의 역할을 담당하지 않는다. 여름철 폭염으로 인한 급격한 전력 수요와 겨울철 혹한으로 인한 발전 조건이 되지 않는다면, 전력 수요에 맞는 공급이 어렵다. 이에 대응을 해야 하는데, 만약 대응하지 못한다면 대규모 정전, 즉 블랙아웃 현상이 발생하여 실시간 전력 수요 대응의 중요성이 커지고 있다. 이를 해결하기 위한 유연발전원의 필요성이 점차 커지고 분산 발전원 중 기동성이 좋고, 안정적인 전력 공급을 할 수 있으며, 다양한 연료종 사용을 통한 청정연소 구현이 가능한 마이크로 가스터빈이 급부상 하였다.

수송 분야에서는 내연기관에서 전기차로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 이

러한 성장으로 인해 전기차의 핵심 부품인 배터리의 생산과 폐기 또한 증가하게 되었으며, 이는 폐배터리를 처리해야 하는 또다른 문제를 야기하였다. 기존의 폐배터리의 처리 방법으로는 크게 Re-use와 Re-cycling으로 나뉘게 되는데, Re-cycling의 경우 Re-use를 하지 못하거나 사용이 불가한 제품에서 원료를 추출하는 방법으로 최후의 처리 방법으로 알려져 있다. Re-use에 초점을 맞추어 ESS에 적용하는 연구와 관련 사업들이 활발히 진행중이다.

따라서 본 연구의 목적은 Fig. 1과 같이 덩 커브 현상[1]의 취약점인 일몰직전부터 초저녁시간때(약 3시간)의 급격한 전력 수요를 보완하고 나아가 대규모 정전시 실시간 전력 수요에 맞는 공급이 가능하도록 함에 있다. 이에 신재생발전을 통해 ESS에 저장된 잉여전력을 활용하여 가스터빈의 시동기를 가동시키고, 가스터빈으로부터 생산된 전력과 ESS에 저장된 전력을 활용하여 더욱 빠르게 덩 커브 현상의 급격한 전력수요를 보완할 수 있는 조합 시스템인 EIGT(ESS integrated Gas Turbine)의 개념을 제시한다. EIGT 구현을 통해 기존의 신재생에너지원의 출력 불균형 문제와 전력 품질 문제를 해결하고 계통의 안정화에 도움이 될 수 있다.

EIGT의 Turndown 운전을 통해 각 부하에서 생산될 수 있는 전력을 확인하고, 실시간 전력 수요에 맞는 공급을 할 수 있다. 전력 수요가 급격할 경우 최대 부하로 전력을 최대 전력을 생산하고, 전력부하가 안정화된 저녁에는 전력 수급량에 따른 운전을 하여 보완해줄 수 있다.

ESS의 경우 재료 및 생산 비용이 줄고, 배터리 생산시 생성되는 온실가스 감소의 이점이 있는 전기자동차에서 사용된 폐배터리(SOH 80%)를 활용한다. ESS에서 배

터리 별 SOC와 SOH, 용량, 온도, 내부저항 등 Aging된 폐배터리가 ESS 모델에 재
 사용시 배터리의 노화 및 성능 저하를 수치적으로 확인한다. Aging된 셀 배터리는
 같은 수준으로 노화를 시켜 Lumped Rack 모델로서 해석을 진행하였으며, 배터리
 개별 셀의 SOC와 aging은 GT-AutoLion을 활용하여 연구를 수행하였다. 폐배터리를
 모사하기 위해 cycle aging을 활용하였으며, EV의 수명인 약 10년(3650cycle)인 하
 루 한번의 충전/방전 사이클로 가정하여 연구를 수행했다. 폐배터리를 적용한
 EIGT 시스템을 통해 그리드로 송전되는 전력량이 향상되어 기존의 덕 커브 현상이
 보완할 수 있다..

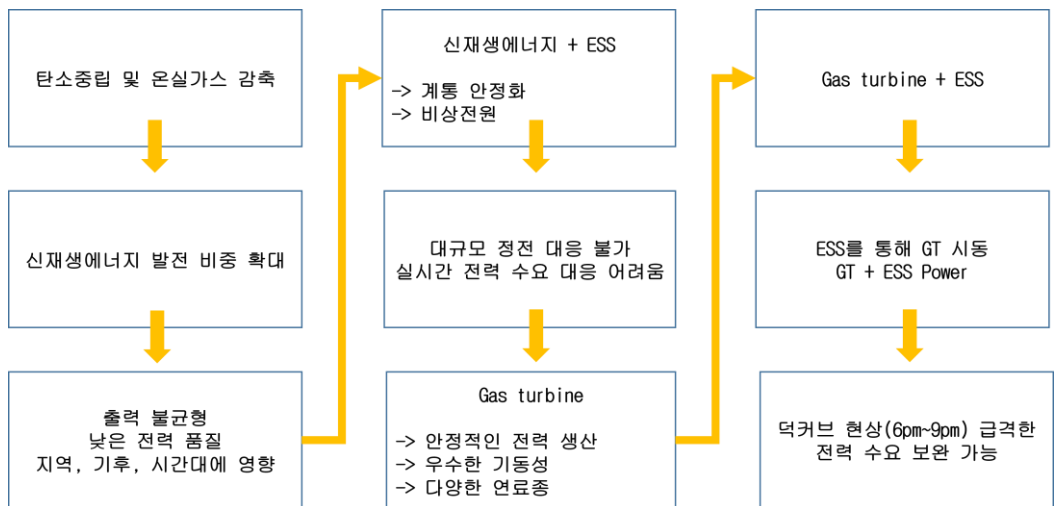


Figure 9. Schematic diagram of research objective

CHAPTER 2. METHODOLOGY

2.1 Modeling overview

본 연구는 Model-in-the-loop를 활용하여 1-0 모델링 기반 수치해석 연구를 진행하였다. 이는 모델 기반 설계를 통해 복잡한 시스템에 대한 신뢰성을 확보하고, 개발 비용과 시간을 절감하는 장점을 가지고 있으며, 이를 활용하여 MGT(Micro gas turbine)와 배터리 ESS를 결합한 EIGT 모델로 ESS는 폐배터리 재사용에 초점을 맞추었으며, EIGT에 적용하여 재사용 배터리의 성능에 맞춰서 연구를 하였다. Figure. 10은 본 연구의 전체적인 연구 흐름을 나타낸다. MGT과 ESS를 결합시킨 EIGT 시스템을 1-0 모델링 하고, Autolion 가상 셀이 실제 셀의 셀 밸런싱을 제대로 반영하는지 확인하기 위하여 calibration 과정을 거친다. 이후 여러변수들의 Optimization 과정을 통해 수치해석과 실제 방전 곡선의 RMS 측정값을 비교하여, 데이터의 신뢰도를 확보하였다. RMS는 평균 제곱근 값으로써 연속적으로 변하는 함수에서의 오차를 측정할 수 있다. 이를 기반으로 데이터 비교 결과 RMS 측정값이 2 이내의 오차를 보였으며, 수치해석적 모델의 신뢰도를 확보하였다. 이후 NEDC driving 사이클을 통해 Aging 시켜 배터리의 용량을 SOH 80% 까지 감소시켜 Aging된 셀 배터리를 모사하였다. 동일하게 노화된 배터리를 Rack화 하여 EIGT 모델에 적용 및 배터리 방전을 통해 재사용 배터리와 기존 reference 배터리의 SOH, SOC, 온도, 내부 저항 등을 비교하였다.

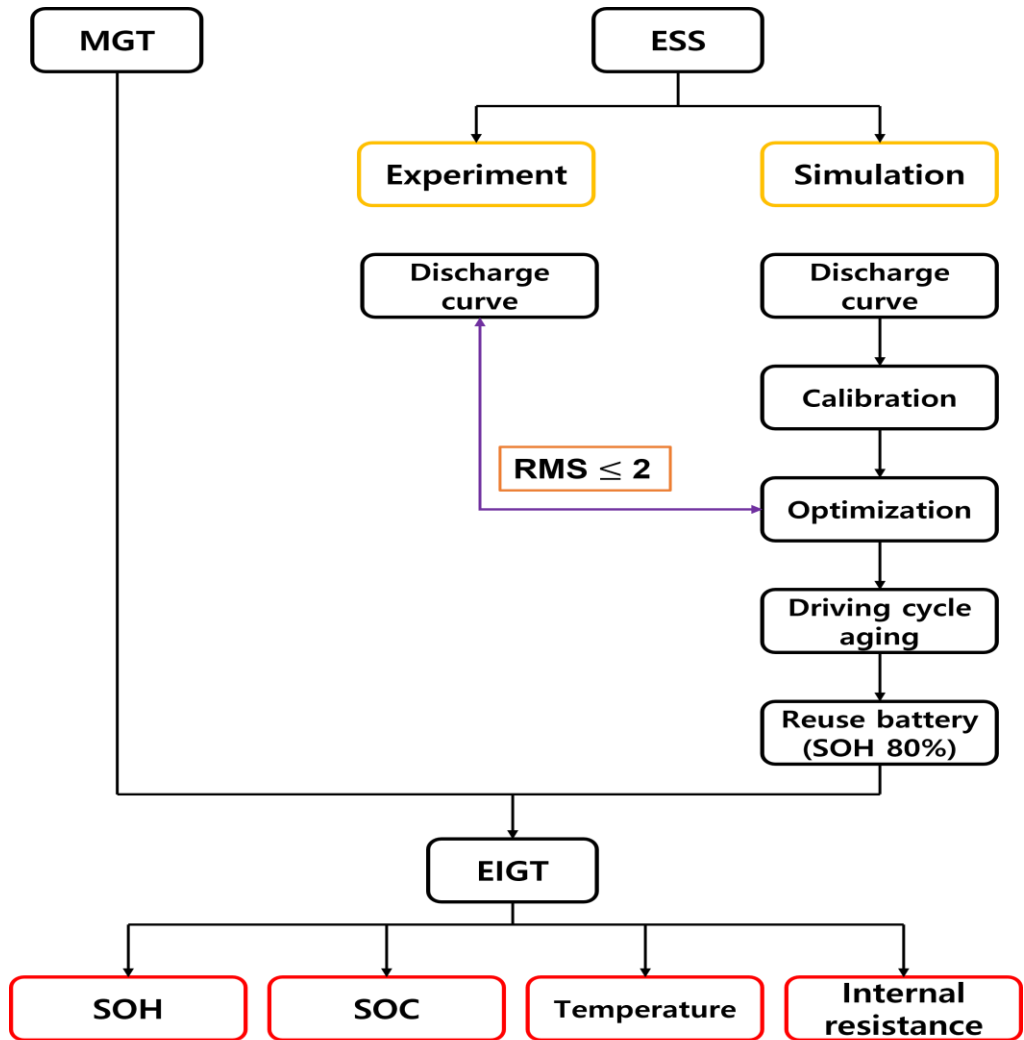


Figure 10. Overall research flow

2.1.1 ESS Integrated Gas Turbine system model description

Figure. 11은 마이크로 가스터빈과 ESS를 결합한 시스템으로서 EIGT 개략도를 표현하였다. 마이크로 가스터빈은 시동기, 압축기, 연소기, 터빈, 발전기로 구성된다. Compressor를 통해 유입된 공기가 압축이 되어 연소기에 전달되며, 압축된 공기는 연소기 전단에서 연료와 premixed되어 연소반응을 일으킨다. 이 때 연소기로부터 생성된 burned gas가 터빈 전단으로 유입되어 전력을 생산하고 발전기를 통해 기계적 power를 전기적 power로 전환을 하여 교류 전력(AC)을 생산해낸다. 이후 컨버터를 통해 교류전력(AC)을 직류 전력(DC)으로 변환하여 배터리에 저장한다. ESS는 저장된 전력을 통해 가스터빈을 발전시키는 시동기로서의 역할을 할 수 있으며, ESS에 저장된 전력 또한 grid로 송전되어 덕 커브 3시간의 급증하는 수요를 더욱 효율적으로 총당할 것이라 판단된다.

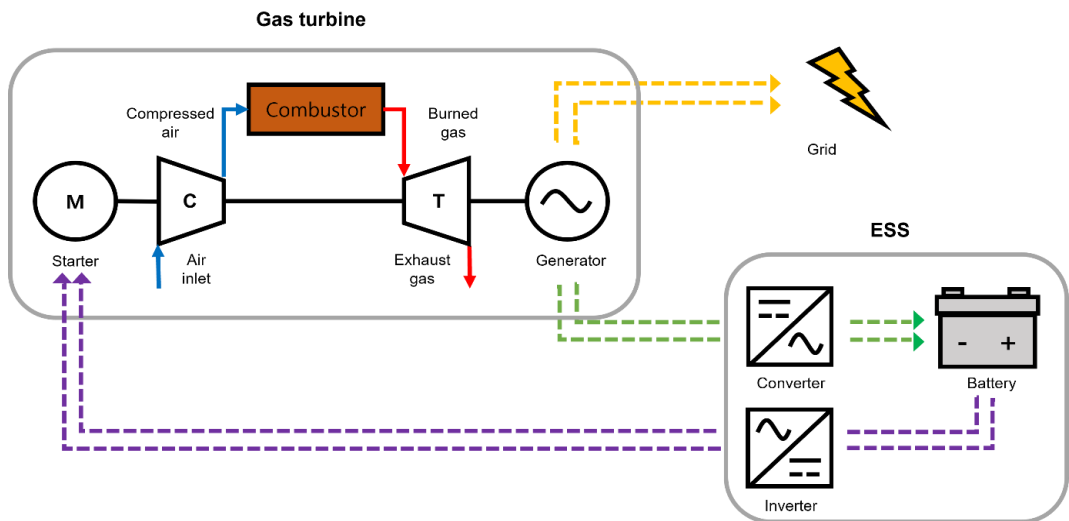


Figure 11. Schematic of EIGT 1-D simulation model

2.1.2 EIGT Simulation model

EIGT 1-0 모델은 GT-SUITE과 AutoLion을 통해 모델링 되었다. GT-SUITE은 다목적
 으로 사용가능한 물리 시뮬레이션 플랫폼으로 시스템의 성능 분석 및 예측이 가능
 하다. AutoLion은 배터리 내부의 전기화학적 물리 기반 접근방식을 사용하여 리튬
 이온 전지 내의 전기화학적 프로세스를 예측할 수 있다. EIGT 모델은 Fig. 12와
 같으며, 가스터빈과 ESS를 결합하여 모델링 하였다. 가스터빈의 성능은 선행 연구
 인 150kWth의 heat output과 TIT 1200 K을 가진 마이크로 가스터빈 단일 연소기를
 응용하여 진행하였다.[40] 선행연구의 Fast running model에 선박용 compressor와
 turbine map을 적용하여 해석을 진행하였으며, reference model과 target model의
 중요 성능 인자들을 Table 1[40]에 나타냈다. 가스터빈의 연료는 메탄을 사용하였
 으며, 최대부하 4.5 bar에서 당량비는 0.36, TIT는 1200 K, Rated power는 약 27
 kW, Rated speed는 약 110000 rpm이다.

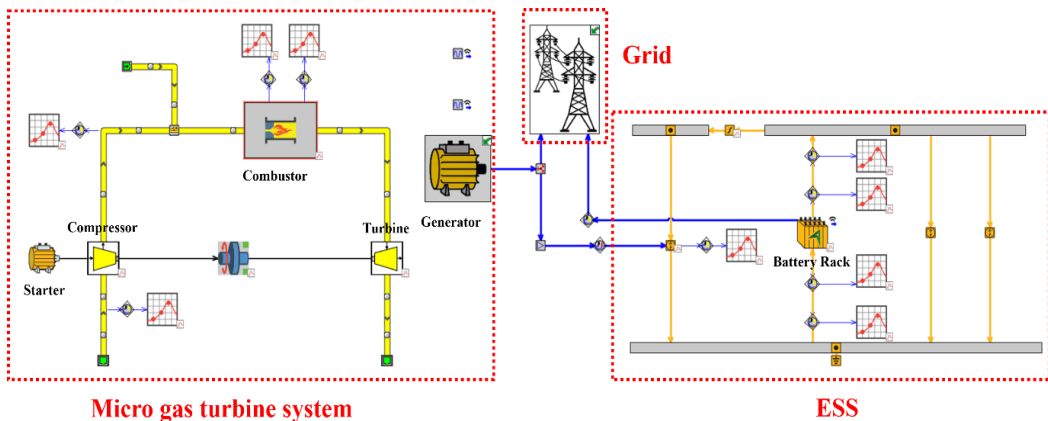


Figure 12. Schematic of EIGT in GT-SUITE

Table 1. Main performance parameters of the gas turbine combustor at 4.5bar.

Item	Symbol [unit]	Reference($150kW_{Thermal}$)	Target($150kW_{Thermal}$)
Air	Mass flow rate(kg/s)	0.145	0.143
	Inlet pressure(bar)	4.5	4.5
Fuel	Mass flow rate(kg/s)	0.003	0.003
	Inlet temperature(K)	498	498
Equivalence ratio	-	0.335	0.36
Target TIT	Temperature(K)	1200	1200
Actual TIT	Temperature(K)	1209($\pm 5\%$)	1202($\pm 5\%$)
Target NOx	ppm	<5	-
Actual NOx	ppm	1.9	-
Rated power	kW	-	27
Rated speed	RPM	-	110000
Efficiency	%	-	18

2.2 Micro gas turbine modeling

가스터빈 시스템은 Brayton cycle을 사용하였으며, Fig. 13에 나타난 것처럼 가스터빈, 시동기, 발전기로 구성된다. 가스터빈은 compressor, combustor, turbine, fuel injector, fuel control로 구성된다. 연료와 압축된 공기는 연소기 전단에서 premixed 되어 연소기로 유입되어 연소된다.

Figure 14는 Fig. 13의 개략도를 기반으로 GT-SUITE을 활용하여 구성한 마이크로 가스터빈 모델을 나타냈다. EIGT 구성 이전에 마이크로 가스터빈의 성능을 확인하였으며, Figure 15는 각 부하별 가스터빈의 성능에 대한 그래프로 0.4의 equivalence ratio를 유지하고, Load_pressure가 증가함에 따라 Speed(rpm), Power 과 TIT(Turbine Inlet Temperature)가 증가하여 타겟인 1200K 근처에서 수렴함을 보여준다. 모델링한 마이크로 가스터빈 구성요소들은 열역학적 이론에 의한 물리학 법칙으로 나타낼 수 있으며, 지배방정식은 다음과 같다. [41-42]

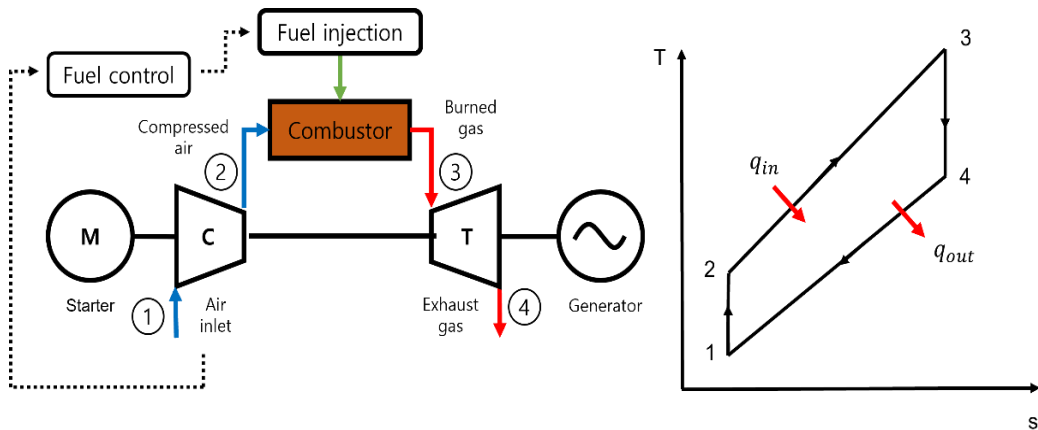


Figure 13. Schematic of micro gas turbine model

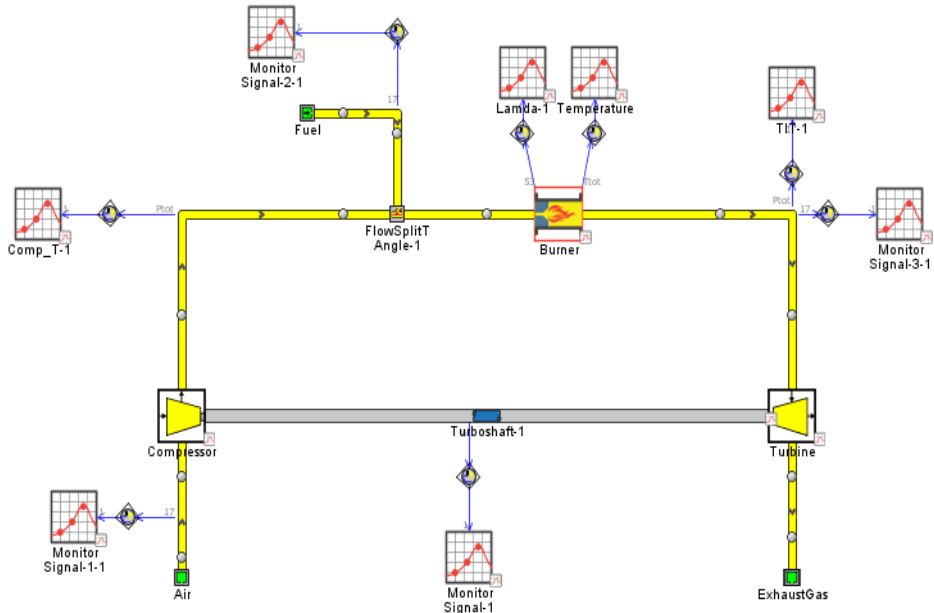


Figure 14. Schematic of gas turbine in GT-suite

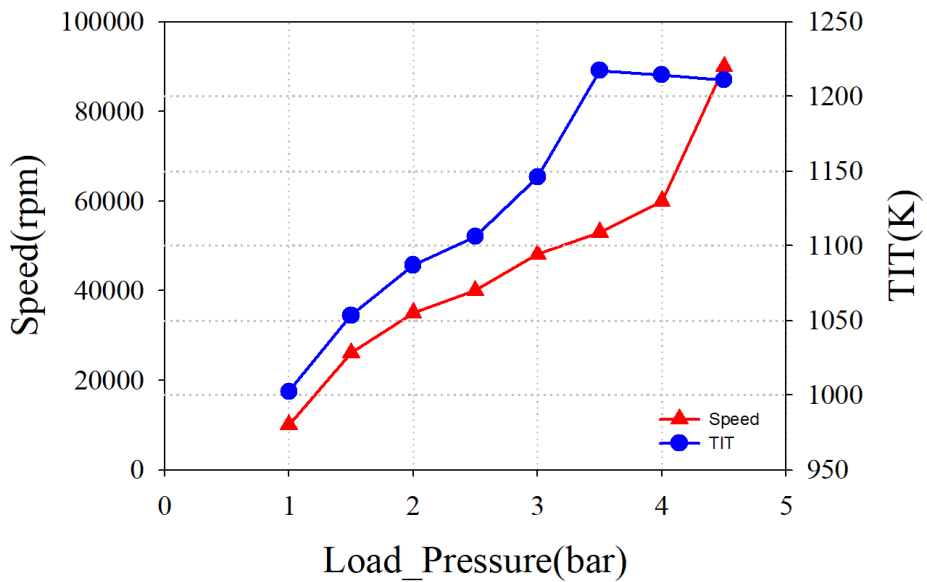


Figure 15. TIT and shaft speed versus Load_pressure

● Compressor

$$\pi_c = \frac{P_{02}}{P_{01}} \quad (1)$$

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = 1 + \frac{1}{\eta_c} \times \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$w_c = c_p T_{01} \left(\frac{T_{01}}{T_{02}} - 1 \right) \quad (3)$$

● Turbine

$$\pi_t = \frac{P_{03}}{P_{04}} \quad (4)$$

$$\frac{T_{04}}{T_{03}} = 1 - \eta_t \times \left(1 - \pi_t^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (5)$$

$$w_t = (1 + f) C_p T_{03} \left(1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \right) \quad (6)$$

π_c 는 compressor의 압축비이다. P_{01} 는 compressor의 total inlet pressure, (Pa); P_{02} 는 total pressure of compressor, (Pa); P_{03} 는 total inlet pressure of turbine, (Pa);, P_{04} 는 total outlet pressure of turbine, (Pa); T_{01} 는 total inlet temperature of compressor, (K); T_{02} 는 total outlet temperature of compressor, (K); T_{03} 는 total inlet temperature of turbine, (K); T_{04} 는 total outlet temperature of turbine, (K); π_t 는 turbine pressure ratio, w_t 는 turbine output power, (kW).

● Combustion chamber

연소영역의 설계식은 combustion loading parameter (CLP)와 combustion intensity calculation 식을 활용하여 사용하였다. 이는 연소 장비 설계 시 적용되는 수식이며, 수식은 다음과 같다. [43-44]

$$f = \frac{m_f}{m_{air}} \quad (7)$$

$$m_{gas} = (1 + f) \times m_{air} \quad (8)$$

$$m_{air} + m_f = m_{gas} \quad (9)$$

$$Q_f = m_f \times LHV \quad (10)$$

$$\phi = \frac{\left(\frac{Mass_{air}}{Mass_{fuel}}\right)_{stoic}}{\left(\frac{Mass_{air}}{Mass_{fuel}}\right)_{actual}} \quad (11)$$

$$Combustion\ loading\ parameter = \frac{\dot{m}_3}{VP_3^{1.8} 10^{(0.00145 \times (T_3 - 400))}} \quad (12)$$

위 식에서 V는 연소 체적으로 라이너의 체적을 나타낸다. 각각 연소기 내부로 유입되는 공기와 연료의 혼합물의 체적유량, 압력, 온도를 나타낸다. 연료의 체적유량이며, LHV(KJ/kg)는 연료 저위발열량을 나타낸다.

- **Thermal efficiency**

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_f} \quad (14)$$

- **Co-working condition**

본 시스템에서 compressor와 turbine은 물리적으로 같은 속도로 회전하며, 발전기를 회전시키며, 이때 발전기에서 생산되는 전력은 Turbine output power에서 compressor consumed power를 뺀 값으로 나타낸다. 이를 만족시키는 방정식은 아래와 같으며, Co-working condition은 다음과 같은 작동조건을 반드시 만족시켜야 한다. [41]

$$W_{net} = W_t - W_c \quad (15)$$

$$W_c = m_{air} C_p T_{01} \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1 \right) \quad (16)$$

$$W_t = m_{air} (1 + f) C_p T_{03} \left(1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \right) \quad (17)$$

$$N_c = N_t \quad (18)$$

2.3 Battery modeling

배터리에 사용되는 지배방정식은 전하 보존 방정식으로서 Li 활성 물질은 방사적으로 이산화되며, 활성 물질 농도에 대한 Fick의 확산 법칙에 기초하여 도출된다. 이 방정식은 활성 물질 입자(r 방향)에서 Li 이온의 미세한 고체 상태 확산을 설명한다. 이에 대한 방정식은 다음과 같다. [45]

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_s^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) - j^{Li} - a_{dl} c \frac{\partial (\phi_s - \phi_e)}{\partial x} \quad (19)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} + j^{Li} + a_{dl} c \frac{\partial (\phi_s - \phi_e)}{\partial x} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon c_e] = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t^0}{F} j^{Li} \quad (21)$$

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_s r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (22)$$

식 19와 20은 각각 solid phase와 electrolyte에서의 charge conservation을 나타낸다. 식 21과 22는 각각 electrolyte-phase 와 Active Material Li에서의 Species Conservation을 나타낸다.

2.3.1 Lumped Battery rack model

배터리의 SOC를 확인하기 위한 식은 다음과 같다.

$$SOC(t) = \frac{SOC_{init} \times Capacity - \int_0^t I_{oc} dt}{Capacity} \quad (23)$$

하여 ESS를 모사하였으며, 관련 식은 다음과 같다.

$$\frac{V_{Rack}}{V_{cell}} = \text{number of series cells} \quad (24)$$

$$P_{Rack} = V_{Rack} \times I_{Rack} \quad (25)$$

위의 식을 활용하여 구성한 배터리 Rack의 직 병렬 구성은 Table 2와 같다.

Table 2. Cylindrical cell series and parallel number

Model	INR 18650 – 29E	IFR 26650	INR 21700 – 50G
Series	216	267	218
Parallel	21	18	12

ESS 용량 산정에 관하여 표준화된 기술기준이 마련되어 있지 않아 대개 태양 광발전소 용량의 2.5~3.5배의 기준을 권장하며[46], 본 연구에서는 가스터빈 생산 전력 27kw의 3.5배인 약 94 kwh에 대해 약 51.8 kWh 용량을 가진 2개의 Rack으로 구성하였다. 각 배터리의 사양에 맞게 배터리 Rack의 용량을 약 51.8 kWh에 맞추어 설계하였으며, 기준은 INCELL 社の LIB-R-09 model의 스펙을 차용하였다. ESS에 저장된 전력을 통해 가스터빈을 발전시키는 시동기로서의 역할을 할 수 있으며, ESS에 저장된 전력 또한 grid로 송전되어 덕 커브 3시간의 급증하는 수요를 더욱 효율적으로 충족할 것이라 판단된다.

2.4 Battery experiment & simulation setup

2.4.1 Battery experiment conditions

본 실험에 사용된 배터리는 Fig. 16의 INR 18650- 29E, IFR 26650, INR 21700-50G를 사용하였다. 실험장비의 구성은 Fig. 17 (a), (c)에 나타났다. MACCOR 社の 배터리 충전/방전 장비 (전류 정확도 0.05%, 전압 정확도 0.02%)를 사용하여 실험을 실시하였으며, 충방전기 내부 소프트웨어를 활용하여 실험 procedure 및 그래프를 구성하였다. 각각의 배터리가 동일 환경에서 실험을 위해 챔버(JeioTech, 정확도 0.3℃)의 온도를 25℃로 설정하였다.

2.4.2 Battery experiment procedure

Figure. 17 (b)는 배터리 충전/방전 실험 절차를 나타냈다. 실험은 챔버의 온도가 25℃에 도달한 후에 충전/방전 테스트를 진행하였다. 안정적인 배터리 상태에서 실험하기 위해 1시간의 휴지시간을 설정하였다. 이후 각각의 배터리의 data sheet 내에 명시 되어있는 충전/방전 속도에 맞추어 CC(Constant current), CV(Constant voltage) 방법으로 충전하였다. 배터리 셀이 완전히 충전된 이후에 셀은 2시간의 휴지시간을 보내며, 이후 CC 방전을 각각의 배터리 셀 마다 Cut off 전압에 맞추어 규정 방전 속도로 진행하였다. 완전히 방전된 이후 2시간의 휴지시간을 거쳐 충전/방전 테스트가 마무리된다. 안정적인 배터리 셀 테스트를 위해 실험 중 휴지시간을 2시간으로 설정하였다.

Table 3. Battery specifications and operation

Item	Specification		
Model	INR 18650-29E	IFR 26650	INR 21700-50G
Rated capacity	2900mAh	3400mAh	4850mAh
Nominal Voltage	3.65V	3.2V	3.63V
Cut-off Voltage	4.2 / 2.5V	3.65 / 2V	4.2 / 2.5V
Charging Method (CC-CV)	0.5C / 4.2V to 0.02C	0.5C / 3.65V to 0.05C	0.33C / 4.2V to 0.025C



Figure 16. Cylindrical battery cells used in the experiment

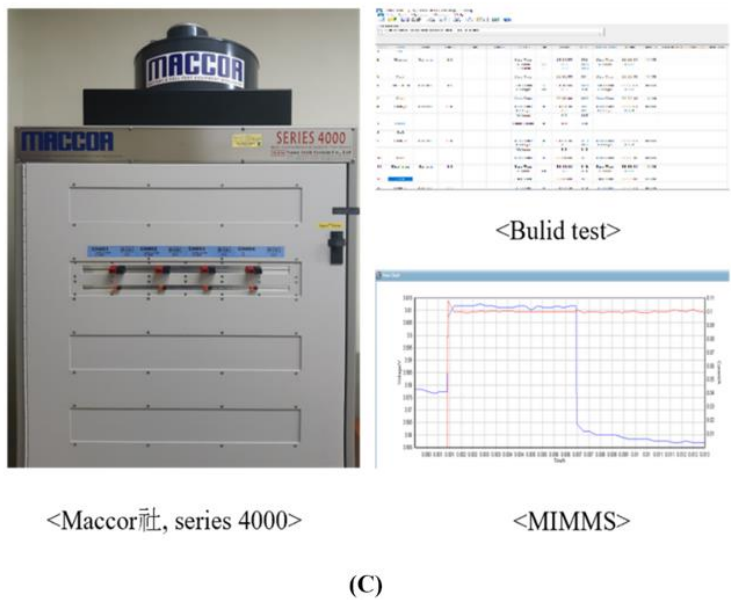
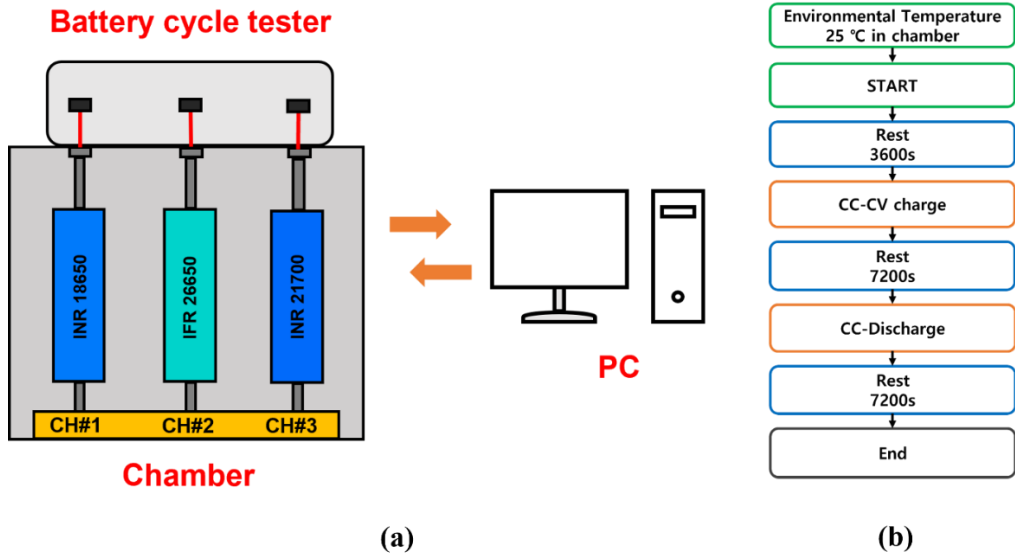


Figure 17. (a) Battery experiment set up, (b) Battery charge/discharge test procedure
(c) MACCOR 社, series 4000 configuration

2.5 Autolion 1-D simulation model

2.5.1 Battery model calibration

실험을 통해 나온 결과값과 비교를 위한 AutoLion 상의 1-D model을 Fig. 18에 나타낸다. 배터리 Data sheet 상의 upper/lower cut off 전압, 용량 등의 값을 AutoLion cell에 적용한 후 Capacity loading, N/P ratio, Cathode/anode active materials First charge capacity, First discharge capacity 등을 변수로 Optimization을 진행하여 실험값과 시뮬레이션 데이터 간의 오차 측정값인 RMS를 이용하여 가상 셀의 신뢰도를 확보하였다.

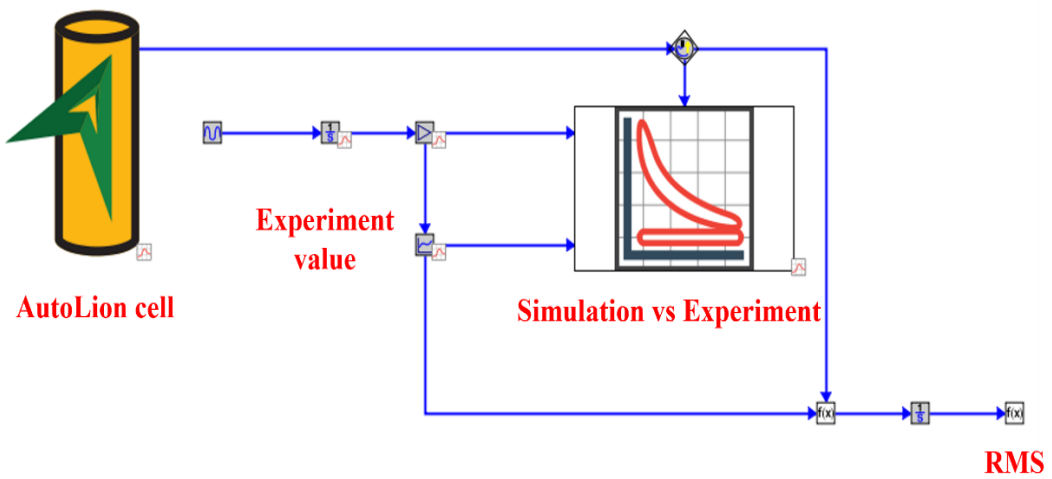


Figure 18. Battery 1-D simulation model in the GT-Autolion.

2.5.2 Battery Aging model by drive cycle

Figure. 19는 drive cycle을 사용한 AutoLion 상의 battery aging cycle 1-D 모델과 drive cycle aging에 대한 과정을 나타냈다. 2.5.1에서 최적화된 배터리 모델을 초기 상태에서 가속한 배터리 사용환경을 위해 NEDC cycle을 10번 반복하여 하루 약 3시간 정도의 방전 후에 Table 4의 각 배터리 조건에 맞는 CC-CV 충전을 한다. 이후 약 1시간 정도 휴지를 하며, 배터리 수명인 약 10년을 가정하여 3650 cycle을 반복하여 배터리 Aging을 모사하였다.

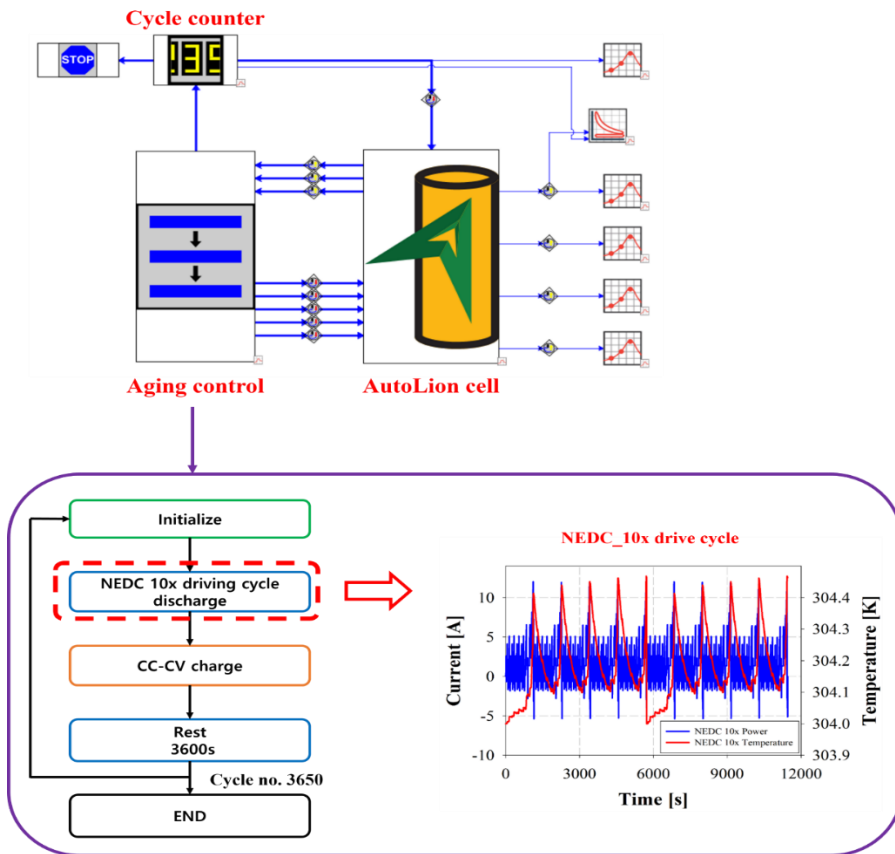


Figure 19. Battery drive aging 1-D simulation model in the AutoLion

2.6 Design of Experiment & Single-objective optimization pareto

2.6.1 DOE and Single-objective Pareto optimization

배터리 용량 Calibration을 위해 Design of experiments(DOE) method가 사용되었다. 본 연구에서는 DOE factors에 대한 샘플링 포인트를 추출하기 위해 Full factorial 샘플링 방법을 사용하였다. Full factorial DOE 설계는 다양한 수준의 입력이 출력에 미치는 영향을 결정하기 위해 실험을 설계하고 수행하는 여러 접근 방식 중 하나로서 DOE의 목적은 출력을 최적화할 입력 수준을 결정하는 방법이다. 각 배터리의 용량을 맞추기 위한 Calibration 과정에서의 DOE Factor는 Capacity loading, N/P ratio 변수에 Full factorial 샘플링을 사용하여 배터리 용량을 Calibration 하였다. 이후 배터리별 방전곡선의 최적화를 위해 DOE Full factorial sampling 방법을 기반으로 RMS 값이 최소인 1개의 Pareto 최적점을 찾기 위해 Single-objective Pareto optimization 방법을 사용하였다. n개의 변수와 m개의 목표를 특징으로 하는 최적화 과정은 식(7)에 의해 정의된다.

$$\min F(x) \text{ subject to } x \in X = \{x | x \in R_n, G(x) \leq 0\} \quad (7)$$

$$x = [x_1 \dots x_n]^T \quad (8)$$

$$F(x) = [f_1(x) \dots f_m(x)]^T \quad (9)$$

$$G(x) = [g_1(x) \dots g_1(x)]^T \quad (10)$$

Eq (8)은 n 차원 결정 변수, Eq (9)는 m 차원 목적 함수 벡터이며, Eq (10)은 1차원 제약 조건 벡터이다. 본 연구에서, f_1 은 RMS 값을 나타내며, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 은 각각 Capacity loading, N/P ratio, Cathode active material FCC, FDC, Anode active material FCC, FDC이다. 각 인자들은 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Sampling ranges for Single-objective Pareto optimization

Case		1	2	3
Model	Unit	INR 18650-29E	IFR 26650	INR 21700-50G
Capacity loading	mAh/cm ²	2.95~3.05	3.1~3.2	5~5.1
N/P ratio	fraction	1.05~1.15	1.5~2	1.05~1.15
Cathode active material FCC	mAh/g	198~206	156~164	198~206
Cathode active material FDC	mAh/g	178~186	146~154	178~186
Anode active material FCC	mAh/g	368~376	368~376	368~376
Anode active material FDC	mAh/g	346~354	346~354	346~354
Number of Design case number		451 points for each case		

CHAPTER 3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Turndown operation mode

Turndown 운전영역을 Fig. 20 (a), (b)에 나타냈다. Compressor와 Turbine map은 mass flow와 속도에 따른 pressure ratio를 나타내며, 이를 통해 운전영역을 보여주고 있다. Speed는 10000~110000 RPM의 범위에서 운전을 하며 air mass flow rate은 0~0.145 kg/s 범위에서 운전을 한다.

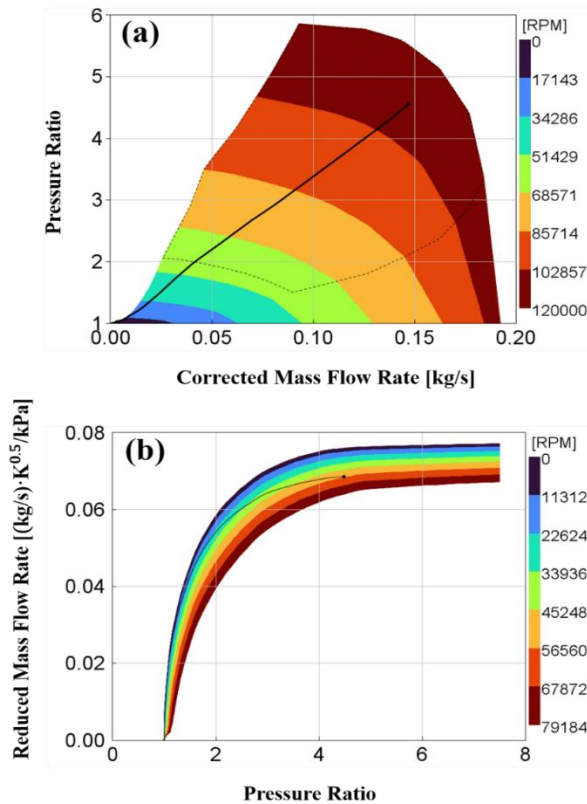


Figure 20. Performance map for (a) compressor, (b) turbine at each operating point

가스터빈에서 Turndown operation은 배기가스 준수 작동 범위로서 피크가 아닌 시간에 최소 부하 작동 중 연료 소비를 크게 줄이는 동시에 Shutdown 횟수를 최소화하는 운전방법이다. 본 마이크로 가스터빈 모델은, Fig. 19에 나타난 것처럼 전체부하 4.5 bar 기준 2 bar까지 전력생산이 가능하며, 기존의 부분부하 Turndown ratio 50 % 보다 넓은 턴 다운 영역을 가지고 있다.

Figure. 21은 Turndown을 통해 각각 1, 2, 3, 4, 4.5 bar에서의 마이크로 가스터빈 운전성능을 나타냈다. 빠른 해석 모델을 위해 1초에 10000 rpm씩 shaft speed의 속도가 상승하도록 하였으며, 11초 이후부터 각 압력에 맞게 Turndown 운전을 한다. 가스터빈의 일정한 온도 영역에서의 각 부하마다 성능을 확인하기 위해 연소 온도 약 1200 K 근처를 기준으로 하여 Turndown operation scenario를 설정하였으며, 청정연소 가스터빈을 위한 당량비 0.36의 운전을 기준으로 하였다. 당량비 운전 방법으로는 초기 당량비를 1까지 증가시킨 후 0.36까지 줄이는 방법으로 운전하였다. 각각의 target 압력을 맞추기 위해 압축기로 유입되는 공기량에 따라 연료량을 제어하였으며, Fig. 21 (c), (g)에 나타난 것처럼 압축기와 터빈의 효율은 1bar에서 가장 낮았으며, 3 ~ 4.5 bar에서는 80 %이상의 효율을 보여주었다. 연소온도 1200 K 이후의 당량비는 연료량에 따라서 일정 비율로 차이를 보였다.

가스터빈 생산전력은 1bar에서 거의 생산되지 않았으며, 4.5 bar에서 가장 많은 전력생산량을 보여주었다. 약 1초 부근에서 가스터빈의 TIT 온도가 급격하게 올라감에 따라 연료 분사량이 적어져 터빈의 효율이 높아지는 것으로 보인다. 이후 연소온도가 서서히 낮아지긴 하지만 당량비도 낮아짐에 따라 연료량이 적어지고, 터

빈의 열효율이 서서히 높아지는 것을 보인다.

EIGT에서의 Turndown operation은 낮은 당량비에서 청정연소를 하는 가스터빈 모델이기에 최고 부하에서 전력을 생산해도 무방하며, 시동기 역할과 동시에 그리드로의 전력공급이 가능하기에 Shutdown 방지를 위해 최소부하로 운전을 하지 않아도 되기에 Turndown 운전을 하지 않아도 된다. 또한 Turndown 운전시 각 부하에서의 전력 생산을 하지 못하고 가스터빈 작동이 멈추어도 ESS에서 그만큼의 전력 보상이 가능하므로 EIGT 시스템에서 보다 넓은 영역의 Turndown operation 이 가능하다. 추가로 2 bar까지 턴다운이 되는 가스터빈을 통해 수요에 맞는 운전을 통해 전력을 공급할 수 있다.

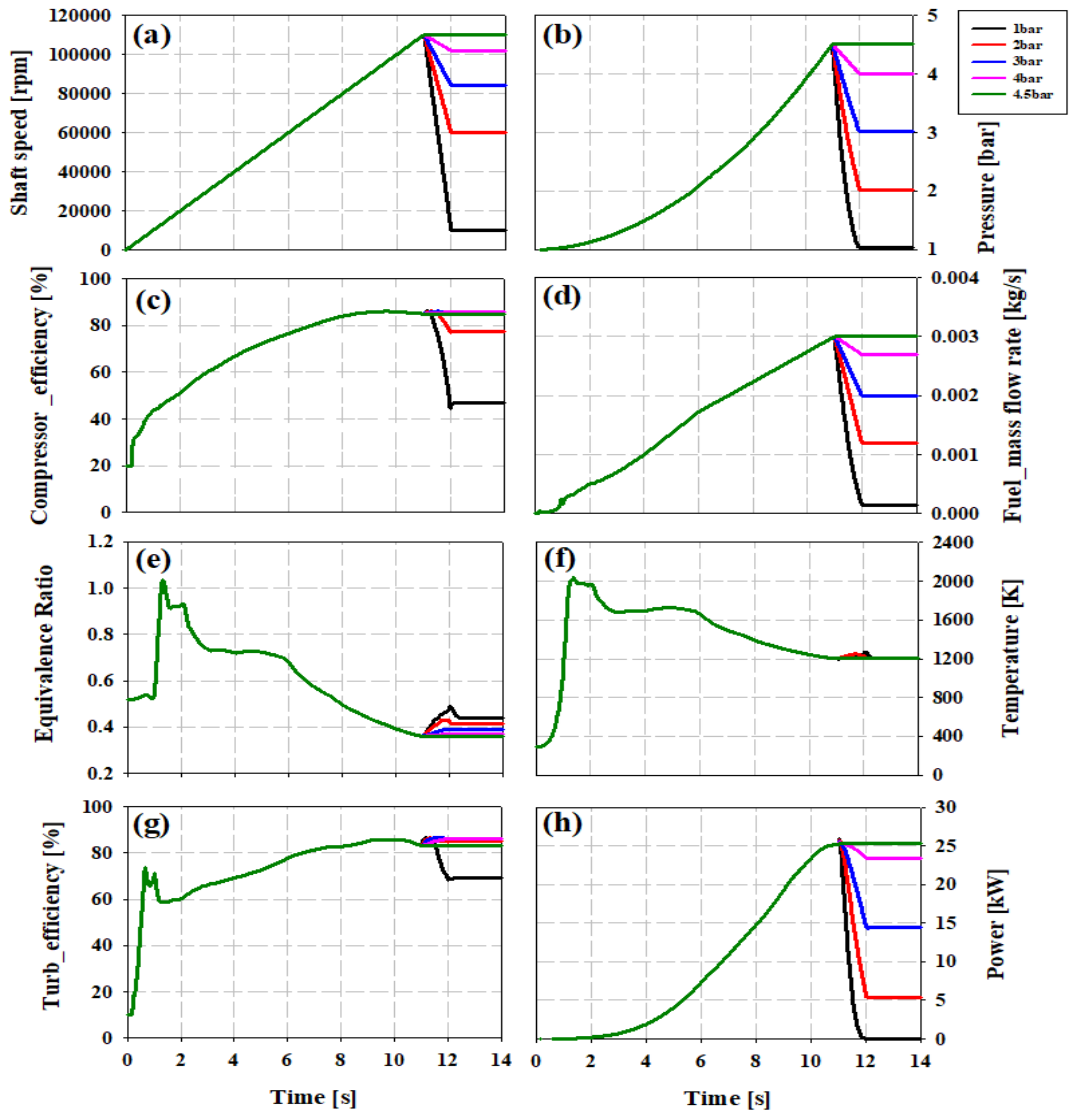


Figure 21. Turndown operation mode in EIGT model

3.2 Optimization & aging of battery model

Figure. 22는 Optimization을 통해 얻은 Pareto design point 값을 나타낸다. 총 451개의 design point 중에서 RMS 값이 근사한 Feasible design point 중 가장 minimize 한 RMS 값을 갖는 Pareto design point를 선정하였다. 각 배터리의 RMS 측정값은 각각 18650 = 1.2, 26650 = 1.58, 21700 = 1.12 이다. RMS 측정값은 모두 2 이하로 Optimization의 값의 신뢰도를 확인하였다.

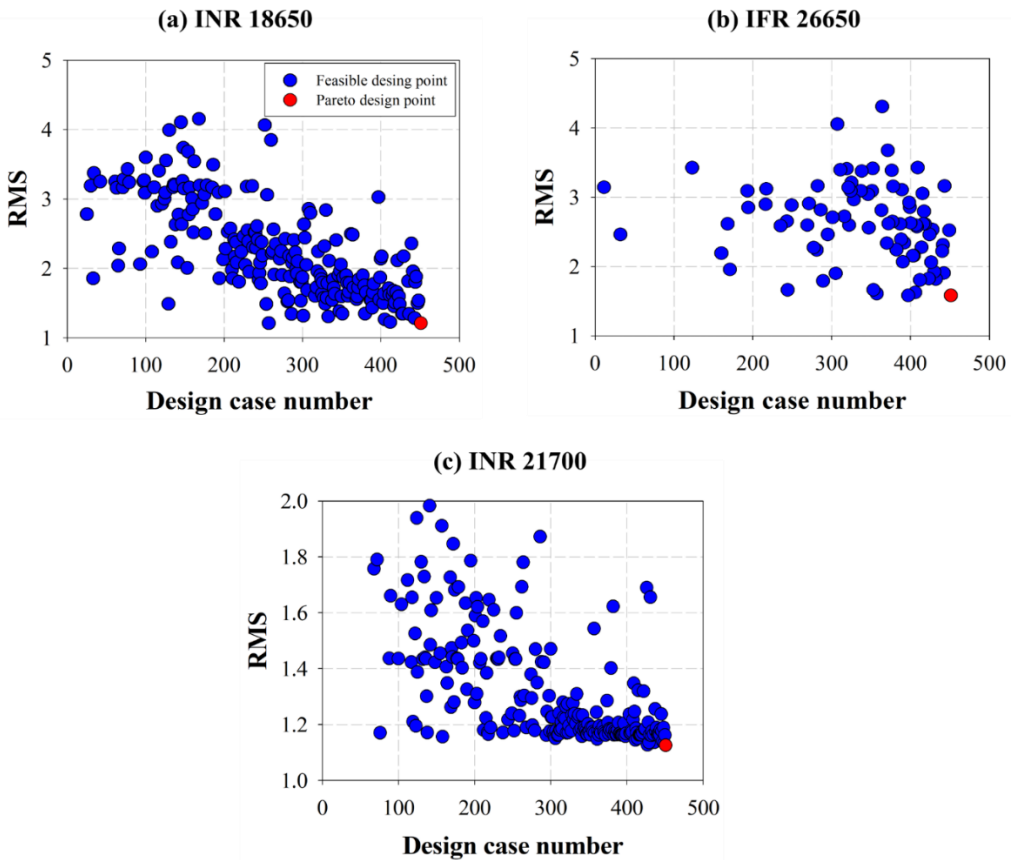


Figure 22. Pareto design point according to optimization by battery type

Figure 23은 RMS 2 이하의 Pareto design point를 기준으로 원통형 배터리 셀의 방전 곡선을 실험데이터와 비교한 결과를 나타냈다. 각 배터리 타입별 초기 작동 전압은 배터리 실험 시 배터리의 SOH 또는 RMS 값에 따라 조금의 오차가 발생하였지만, 각 배터리별 방전곡선의 특성과 경향성은 매우 유사한 것을 보여준다. 따라서 방전곡선에 대한 실험과 시뮬레이션 비교를 통해 최적화된 배터리 방전곡선 데이터를 확보하였다.

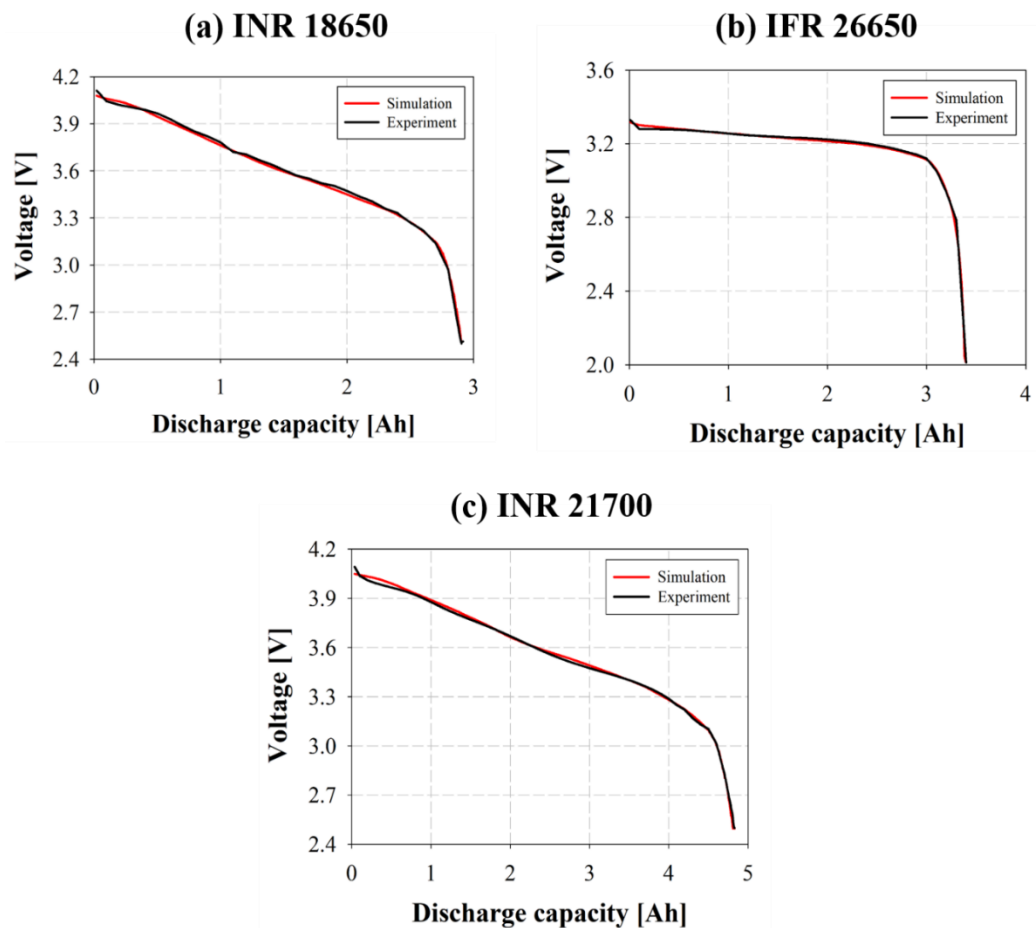


Figure 23. Optimization curve fitting by battery type

Figure. 24 (a)는 최적화된 배터리 데이터에 NEDC_10x driving cycle을 통해 배터리별 용량이 얼마나 감소되었는지 나타냈다. 이를 기반으로 Figure 24 (b)는 신제품 배터리 용량을 SOH 100% 기준으로 노화에 따른 용량 변화를 SOH로 나타낸 그래프이다. Table 5에는 각 배터리 별 노화된 용량과 SOH 수치를 나타냈다. 노화된 배터리 용량은 INR 18650 = 2262mAh, IFR 26650 = 2648mAh, INR 21700 = 3880mAh이며, SOH는 INR 18650 = 77.9 %, IFR 26650 = 78 %, INR 21700 = 80 %로 감소한 수치를 보인다. 이 과정을 통해 SOH 80% 이하의 폐배터리를 모사하였다.

Table 5. Aging capacity and SOH by battery type

Item	Specification		
Model	INR 18650-29E	IFR 26650	INR 21700-50G
Rated capacity	2900mAh	3400mAh	4850mAh
Aging capacity	2262mAh	2648mAh	3880mAh
SOH	78 %	77.9 %	80 %

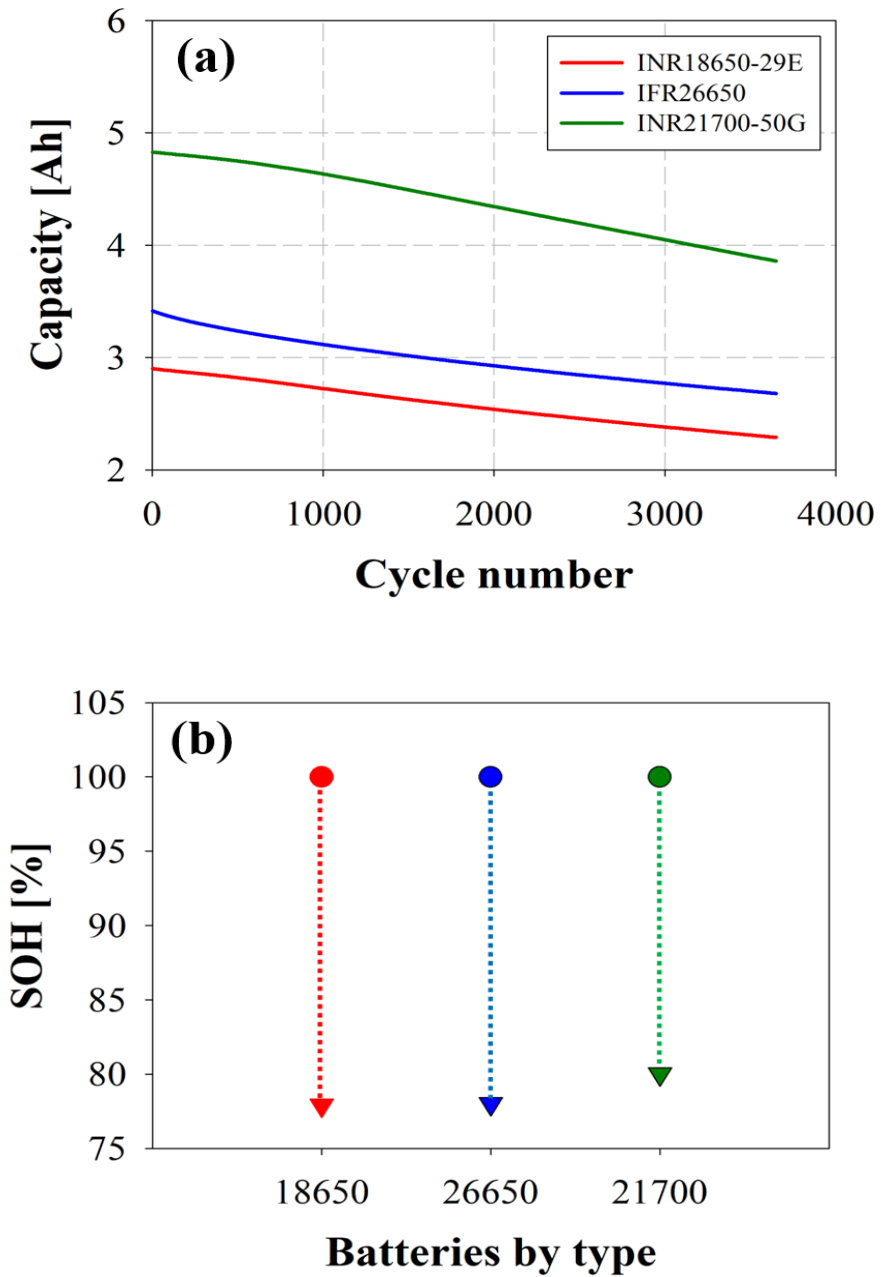


Figure 24. (a) capacity loss (b) SOH by battery type according to driving cycle aging

3.3 Reuse battery vs Reference new battery performance comparison

Figure. 25 (a)는 각 배터리별 재사용 배터리와 Reference new battery가 전력을 소비했을 때의 SOC의 사용시간을 비교한 그래프이다. 에너지 저장 시스템에서 안전한 배터리 방전을 위해 SOC 0.9 ~ 0.2까지 방전하여 시뮬레이션을 진행하였다. 배터리1개의 Rack을 기준으로 해석을 돌렸으며 해석 시간은 1 C-rate으로 방전 시 3600s에서 SOC(0.9-0.2)을 곱하여 2520 s, 재사용 배터리의 경우 노화된 SOH(80%)를 곱하여 약 2016 s의 방전 시간을 기준으로 하였다. 전체적으로 reference 배터리에 비해 reuse 배터리의 방전 시간이 약 400 s 더 짧았다. 그중 양극활물질 LFP0 계열인 26650은 다른 니켈 계열 양극활물질과 달리 방전시간이 긴 것으로 나타났다. 이는 같은 용량에 맞춰 직렬 병렬 구성을 하였지만, 방전 곡선의 특성상 IFR 26650은 전류를 더 일정하게 가하게 되어 방전시간이 더 긴 것으로 확인됐다. INR 18650과 21700의 경우 방전곡선의 전압강하가 됨에 따라 전류가 더 많이 소모되어 방전 시간이 더 짧은것으로 나타났다.

Figure. 25 (c)는 각 배터리별 재사용 배터리와 Reference new battery가 전력을 소비, 즉 방전되었을 경우 내부 저항을 나타냈다. 그 결과 재사용 배터리가 더 많은 저항이 발생하는 것을 확인하였다. Figure. 25 (c)의 IFR 26650의 경우 니켈 계열의 양극활물질을 사용하는 INR 18650, 21700 보다 안정적인 구조의 LFP0를 활용하여 내부 저항이 다른 배터리들보다 더 적게 발생하였으며, 기울기가 완만한 경향을 보인다. 또한 각 그래프의 곡선이 완만하지 못한 것은 실제 데이터와 시뮬레이션 데이터를 최적화하여 커브 피팅 하는 과정에서 RMS 오차를 20이내로 줄였지만, 이 과정에서의 오차로 인하여 발생하였다고 판단된다.

Figure. 25 (e)는 각 배터리가 방전되는 동안의 온도변화를 나타낸다. 방전용량은 Driving cycle aging으로부터 얻은 데이터 값과 동일하게 약 80 %의 용량을 보여주고 있으며, 재사용 배터리가 같은 용량 대비 더욱 온도가 많이 증가하는 경향성을 보인다. 이는 앞서 Figure. 25 (b)의 내부 저항과 연관되는데, Figure. 25 (b)의 경우 IFR 26650 같은 경우 LFP0 양극활물질로 인한 안정적인 구조로 인해 내부 저항이 적게 발생하였으며, 온도 또한 다른 두 배터리들 보다 더 낮은 것으로 확인되었다.

따라서 IFR 26650은 ESS에 재사용 되었을 때 방전 속도, 내부 저항, 온도, 발열에서 가장 안정적인 것을 확인할 수 있다.

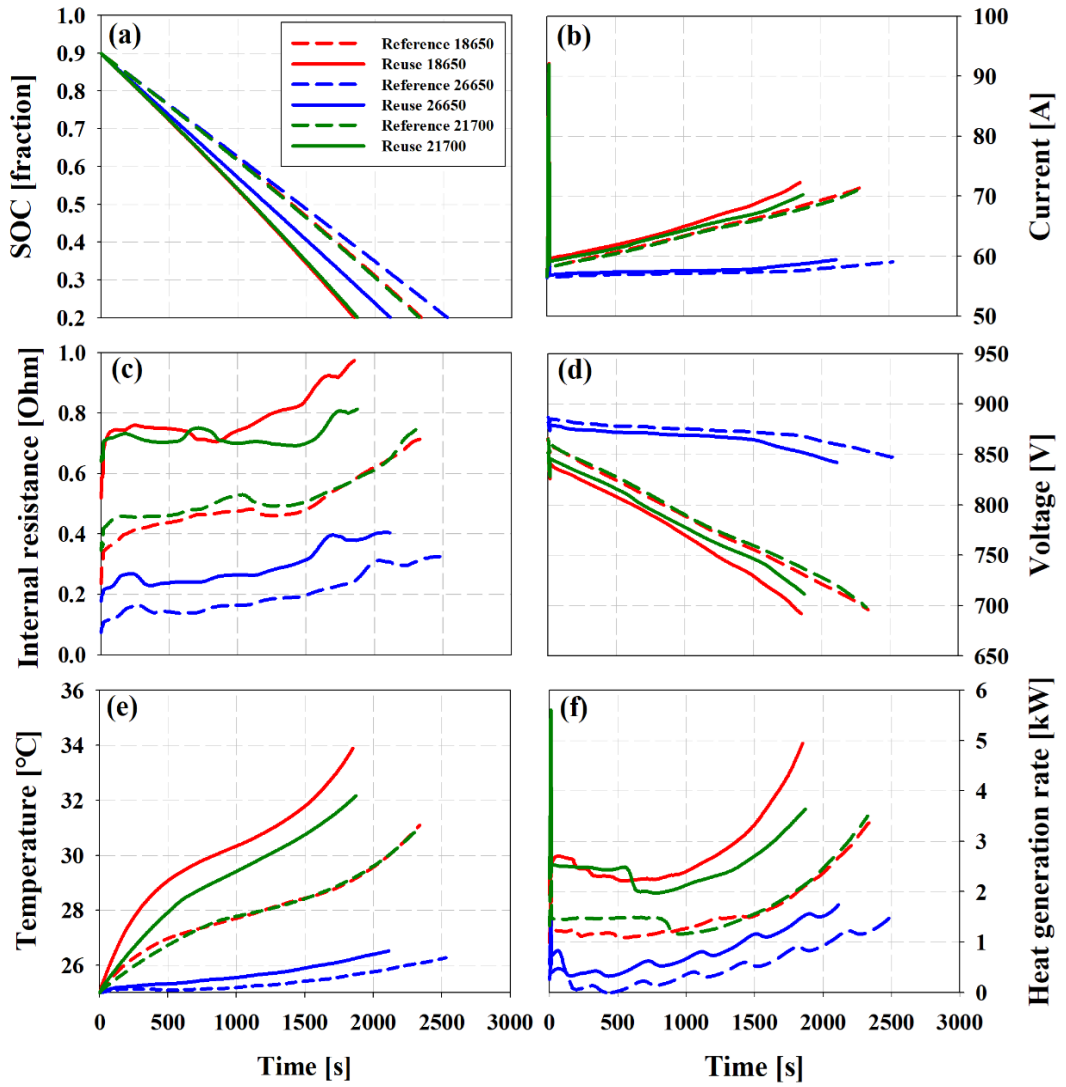


Figure 25. Changes of reused and reference new batteries by battery type

3.4 Compensation of the duck curve with EIGT

Figure. 26은 전체 EIGT 시스템을 통해 덕 커브 현상을 보완하는 것을 나타낸 그래프이다. ESS의 잉여전력을 사용하여 가스터빈을 구동시키고, 기존의 ESS만으로 보완했던 전력량을 기동성이 좋은 가스터빈을 사용하여 추가로 전력을 생산하여 그리드로 송전시 기존 전력 송전량 보다 약 66퍼센트의 향상을 보였다. 또한 구동 환경이 가혹하지 않은 ESS에 재사용 배터리를 활용하여, 효율성을 높였다. 본 연구는 1개의 Rack을 기준으로 하여 약 33분동안 보완 가능하며 덕커브 현상의 급격한 전력 수요에 대응할 수 있다.

이 결과를 통해 Battery Rack의 수를 확대한다면 3시간 동안의 수요에도 대응할 수 있을 것이라고 기대한다.

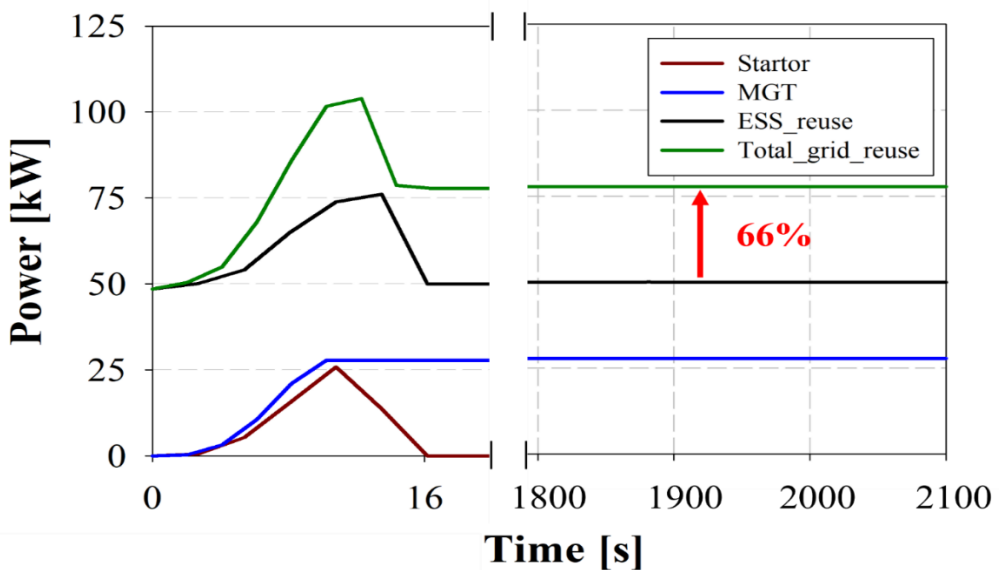


Figure 26. Compensation for duck curve using EIGT system

CHAPTER 4. CONCLUSIONS & FUTURE WORK

본 연구에서는 Model-in-the-loop 시뮬레이션을 통해 가스터빈과 ESS를 결합한 새로운 EIGT 시스템을 1-D 모델링 하였다. EIGT의 ESS에 사용되는 배터리는 SOH 80% 이하의 성능을 가진 재사용 배터리를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 신재생 발전이후 기존 ESS만으로 감당하는 전력 공급량보다 EIGT 모델에서 그리드로 송전되는 양이 향상되어 덕 커브 현상 보완에 대하여 수치해석적으로 확인하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- EIGT 모델은 기본 연소영역 설계식을 활용한 선행연구인 Fast running model의 데이터를 기반으로 실제 선박용 compressor와 turbine의 map을 축소시켜 예측 모델을 만들었다. Compressor와 turbine map의 운전범위는 1 bar에서 4.5 bar이며, 4.5 bar에서 최대 출력과 높은 TIT를 나타낸다. 이를 통해 얻을 수 있는 마이크로 가스터빈의 성능은 다음과 같다. 당량비는 0.36, TIT는 1200 K, Rated power는 약 27 kW, Rated speed는 약 110000 rpm이다. 선행연구인 Fast running model의 성능수치인 TIT, 연료량, 유입되는 공기량 등이 근사한 값을 보임에 따라 예측모델의 신뢰도를 향상시켰다.
- EIGT의 전력생산 가능한 Turndown 영역은 최대부하 4.5 bar 기준 2 bar까지이며, 기존 가스터빈의 부분부하 Turndown operation 50 % 보다 넓은 영역을 가지기 때문에 1-D simulation을 통해 충분한 모사가 가능하다. Turndown operation을 통해 얻은 압축기와 터빈의 효율은 1bar에서 가장 낮았으며,

3~4.5 bar에서는 80 % 이상의 효율을 보여준다. 전력생산은 1 bar에서 거의 생산되지 않았으며, 4.5bar에서 가장 많은 전력생산량을 보여주었다. 3~4.5 bar에서의 높은 효율을 보임에 따라 각 부하에서의 생산 전력을 수요에 맞게 공급할 수 있다.

- Single-objective Pareto optimization을 통해 얻은 배터리 모델 Calibration에 대한 RMS 값은 INR 18650, IFR 26650, INR 21700에서 각각 1.2, 1.58, 1.12이다. RMS 2 이하의 신뢰도를 가진 시뮬레이션 배터리 모델을 NEDC drive cycle을 이용하여 Cycle aging을 실시하였다. 전기차 배터리의 수명을 가정한 약 10년(3650cycle)에 대하여 수치해석을 진행하였다. 이를 통해 폐배터리를 모사하였으며, 각 배터리의 SOH 수치는 INR 18650 = 77.9 %, IFR 26650 = 78 %, INR 21700 = 80 % 로 노화되었다.
- 충·방전 시험을 통해 얻은 배터리 셀 데이터를 Rack으로 확장시켜 EIGT 모델의 ESS에 사용하였다. Reuse battery와 Reference new battery를 비교한 결과 Reuse battery의 방전되는 속도 즉 SOC는 INR 18650 = 21 %, IFR 26650 = 17 %, INR 21700 = 20 % 씩 빠르게 감소하였다. 내부저항은 Reference new battery에 비해 Reuse battery가 최종 저항값 기준 INR 18650 = 0.26 ohm, IFR 26650 = 0.08 ohm, INR 21700 = 0.06 ohm씩 많이 발생하였다. 결과적으로 IFR26650 배터리는 느린 SOC 감소 수치와 낮은 저항값을 보였다. 양극활물질의 차이에 따라 LFP0를 사용한 IFR 26650의 내부저항이 층상구조 NCM, NCA 계열의 양극활물질 보다 더 적게 발생하였다.

- 내부저항의 결과에 따라 배터리의 온도도 비례하여 각각 INR 18650 = 2.8 °C, IFR 26650 = 0.3 °C, INR 21700 = 1.2 °C씩 증가하는 결과를 보여주었다. 비교한 배터리 중에서 IFR 26650의 증가 수치가 가장 적게 나타났다. SOC 감소 수치, 내부저항, 배터리 온도의 결과를 바탕으로 LFP0의 양극활물질을 사용하는 IFR 26650의 배터리가 내부저항 및 온도 증가가 적어 hard한 사이클을 사용하지 않는 ESS에 재사용 될 때 가장 좋은 성능을 보였다.
- IFR 26650의 데이터를 기반으로 1개의 Rack 기준 EIGT에서 생산한 전력량을 기존 전력공급과 비교하면, 약 33분 동안 기존 전력 송전량 보다 약 66퍼센트의 향상을 보였다. 폐배터리를 재사용 함으로써 배터리를 생산하는데 발생하는 온실가스를 감축함으로써 탄소중립에 기여할 수 있다. 또한 구동환경이 가혹하지 않은 ESS에 재사용 배터리를 활용하여, 효율성을 높였다. 이를 통해 덕 커브 현상의 급격한 전력 수요에 대응 및 보완이 가능하며 배터리 재사용을 통한 탄소중립에도 기여할 수 있다.
- 본 연구는 마이크로 가스터빈과 ESS를 결합한 하이브리드 시스템에 관한 연구이다. 기존 신재생에너지의 단점인 덕 커브 현상을 안정적인 전력 생산과 수요에 맞는 전력 공급을 통한 상호 보완적인 역할로서 제시하였다. 향후 Rack을 확장하여 덕 커브 현상의 취약점인 3시간이상의 급격한 전력 수요에 대응할 수 있을 것이라 판단한다. 또한 EIGT 시스템에 관해 구체적인 운전전략에 대한 보완과 C-rate에 따른 배터리에서의 온도 및 저항 등과 같이 다양한 관점에서의 분석을 한다면 연구의 우수성이 보다 강화될 것이라 판단된다. 이는

새로운 하이브리드 시스템을 Model-in-the-loop를 통해 1-D 모델을 구현 및 해석을 수행함에 있어 중요한 연구자료가 될 것이라 기대한다.

Reference

- [1] California ISO, 2016 Energy imbalance market reports.2016.
- [2] Olabi, A.G., Renewable energy and energy storage systems. Energy, 2017. 136: p. 1-6.
- [3] Zhang, C., et al., Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 82: p. 3091-3106.
- [4] Bocklisch, T., Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Applications. Energy Procedia, 2015. 73: p. 103-111.
- [5] Damiano A, Gatto G, Marongiu I, Porru M, Serpi A. Real-Time Control Strategy of Energy Storage Systems for Renewable Energy Sources Exploitation. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2014;5(2):567-76.
- [6] Yekini Suberu, M., M. Wazir Mustafa, and N. Bashir, Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 35: p. 499-514.
- [7] Guerrero, J., et al., Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010. 4(1): p. 52- 64.

[8] Sanaye, S. and M.R. Ardali, Estimating the power and number of microturbines in small_scale combined heat and power systems. *Applied Energy*, 2009. 86(6): p. 895-903.

[9] Mago, P.J. and R. Luck, Evaluation of the potential use of a combined micro_turbine organic Rankine cycle for different geographic locations. *Applied Energy*, 2013. 102: p. 1324-1333.

[10] Ismail, M.S., M. Moghavvemi, and T.M.I. Mahlia, Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine. *Energy Conversion and Management*, 2013. 75: p. 271-281.

[11] Panwar, N.L., S.C. Kaushik, and S. Kothari, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. 15(3): p. 1513-1524.

[12] Ian Beil, Alicia Allen., et al., Considerations when using UtilityScale Battery Storage to Black Start a Gas Turbine Generator. *IEEE*, 2017

[13] Qiu, J., et al., Planning of solar photovoltaics, battery energy storage system and gas micro turbine for coupled micro energy grids. *Applied Energy*, 2018. 219: p. 361-369.

[14] Wang, X., et al., Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 2018. 164: p. 93-101.

[15] Saib, S., et al., Multi-objective Optimization of a Hybrid Renewable Energy System with a Gas Micro-turbine and a Storage Battery. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019. 45(3): p. 1553-1566.

[16] Ahmadi, L., et al., A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015. 22(1): p. 111-124.

[17] Ahmadi, L., et al., Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014. 8: p. 9-17.

[18] Garg, A., et al., Development of recycling strategy for large stacked systems: Experimental and machine learning approach to form reuse battery packs for secondary applications. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 275.

[19] World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, 1987, Oxford University Press, 27 page

[20] Bloomberg New Energy Finance summit, 25 April 2017

- [21] Guerrero J, Blaabjerg F, Zhelev T, Hemmes K, Monmasson E, Jemei S, et al. Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm. IEEE Industrial Electronics Magazine 2010;4(1):52-64.
- [22] pard, Lisa, et al.(2017), “Market Data: EV Geographic Forecast, Battery and Plug_In Hybrid EV Sales and Populations”, Navigant Research Report, Vol. 29
- [23] Singh B, Sharma J. A review on distributed generation planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;76:529-44.
- [24] Pepermans G, Driesen J, Haeseldonckx D, Belmans R, D’haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy 2005;33(6):787-98.
- [25] Chiang S_J, Chang K, Yen C. Residential photovoltaic energy storage system. IEEE Transactions on industrial electronics 1998;45(3):385-94.
- [26] Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science 2009;19(3):291-312.
- [27] Faisal M, Hannan MA, Ker PJ, Hussain A, Mansor MB, Blaabjerg F. Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges. IEEE Access 2018;6:35143-64.

- [28] E. Muljadi, J.T. Bialasiewicz (2003), “Hybrid Power System with a Controlled Energy Storage”, 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
- [29] Hall PJ, Bain EJ. Energy_storage technologies and electricity generation. *Energy Policy* 2008;36(12):4352-5.
- [30] Toledo OM, Oliveira Filho D, Diniz ASAC. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14(1):506-11.
- [31] Etxeberria A, Vechiu I, Camblong H, Vinassa J_M. Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids: A review. *2010 Conference Proceedings IPEC. IEEE; 2010:532-7.*
- [32] Guo J, Li Y, Pedersen K, Stroe D_I. Lithium_Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview. *Energies* 2021;14(17).
- [33] Matsuda Y, Tanaka K. Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE; 2017:1-6.*

- [34] Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 2017;143:757-68.
- [35] Velázquez M, Valio, Santasalo A, Reuter, Serna G. A Critical Review of Lithium_Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries* 2019;5(4).
- [36] Cusenza MA, Guarino F, Longo S, Ferraro M, Cellura M. Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage* 2019;25.
- [37] Kotak Y, Marchante Fernández C, Canals Casals L, Kotak BS, Koch D, Geisbauer C, et al. End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies* 2021;14(8).
- [38] Zhao Y, Pohl O, Bhatt AI, Collis GE, Mahon PJ, Rüther T, et al. A Review on Battery Market Trends, Second_Life Reuse, and Recycling. *Sustainable Chemistry* 2021;2(1):167-205.
- [39] Garg A, Yun L, Gao L, Putungan DB. Development of recycling strategy for large stacked systems: Experimental and machine learning approach to form reuse battery packs for secondary applications. *Journal of Cleaner Production* 2020;275.
- [40] Kim J, Lee H, Park J. Numerical prediction of operating characteristics of micro-gas turbine combustor with on-board reformed EGR system using co-

simulation model and 1D reduced model. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022;47(3):1979-95.

[41] Schobeiri MT. *Gas Turbine Design, Components and System Design Integration: Second Revised and Enhanced Edition*. Springer Nature; 2019.

[42] Saravanamuttoo HI, Rogers GFC, Cohen H. *Gas turbine theory*. Pearson Education; 2001.

[43] Saboohi Z, Ommi F, Fakhrtabatabaei A. Development of an augmented conceptual design tool for aircraft gas turbine combustors. *The International Journal of Multiphysics* 2016;10(1):53-74.

[44] Mestre A, Cadiou A. Design and experimentation of a combustor for high combustion intensity. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 79399. Citeseer; 1985:V002T06A23.

[45] AutoLion-GT User Manual, version, v2022(2022).

[46] Yong_Ha K, Gyu_Rim H, Sang_Hwa H, Hye_Seon L, Jong_Min P, Yu_ri K. The Methodology of Calculating the Optimal ESS Capacity according to PV Power Generation for Grid_Connected PV_ESS System through Optimal Operation. 2021.