



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.

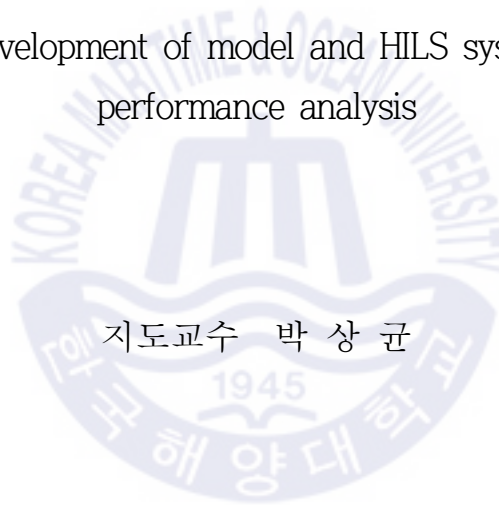
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고분자 전해질막 연료전지 성능 분석용 모델
및 HILS 시스템 개발에 관한 연구

A study for development of model and HILS system for PEMFC
performance analysis



2020年 2月

한국해양대학교 대학원

기관공학과

김 종 인

본 논문을 김종인의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김명환



위원 길병래



위원 박상균



2019년 12월 24일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
List of Symbols	viii
Abstract	ix

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 방법	3

제 2 장 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC) 및 HILS 시스템

2.1 개요	4
2.2 PEMFC의 특성	5
2.3 HILS 시스템의 특성	6

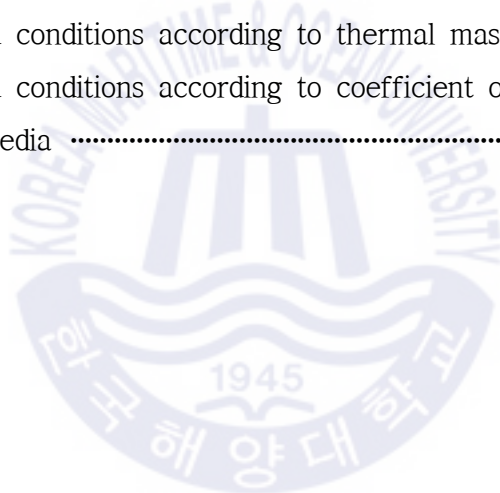
제 3 장 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC) 시스템 모델링

3.1 전체 시스템 구성	7
3.2 시스템 구성 요소 소개	13
3.2.1 PEMFC 스택	13
3.2.2 펌프	19
3.2.3 열교환기	20
3.2.4 탱크	21
3.2.5 PI 제어기	21

제 4 장 HILS 시스템	
4.1 HILS 시스템 구성	22
4.2 HILS 시스템 구성 요소 소개	23
4.3 HILS 시스템 구축 과정	28
제 5 장 연구결과 고찰 및 검토	
5.1 연료전지 모델 검증	58
5.2 연료전지 모델의 조건별 시뮬레이션 결과	61
5.2.1 온도에 따른 영향	61
5.2.2 압력에 따른 영향	66
5.2.3 반응면적에 따른 영향	71
5.2.4 전해질막 두께에 따른 영향	76
5.2.5 스택의 열용량에 따른 영향	81
5.2.6 스택과 냉각매체 사이의 열전달계수에 따른 영향	85
5.3 연료전지 모델 및 HILS 시뮬레이션 결과 비교	89
제 6 장 결 론	91
감사의 글	93
참고 문헌	94

List of Tables

Table 5.1 Conditions of Simulink model simulation	58
Table 5.2 Simulated conditions according to temperature	61
Table 5.3 Simulated conditions according to pressure	66
Table 5.4 Simulated conditions according to active area	71
Table 5.5 Simulated conditions according to thickness of membrane	76
Table 5.6 Simulated conditions according to thermal mass of stack	81
Table 5.7 Simulated conditions according to coefficient of heat transfer to cooling media	85



List of Figures

Fig. 3.1 Schematic diagram of the 120kW PEMFC System	08
Fig. 3.2 Overall simulink model of 120kW PEMFC system	09
Fig. 3.3 Modeling of Oxygen supply system	11
Fig. 3.4 Modeling of Hydrogen supply system	11
Fig. 3.5 Modeling of Stack cooling system	12
Fig. 3.6 Modeling of Stack	12
Fig. 3.7 Modeling of PI controller	12
Fig. 3.8 PEMFC Stack model	18
Fig. 3.9 Pump model	19
Fig. 3.10 Heat Exchanger model	20
Fig. 3.11 Tank model	21
Fig. 3.12 PI-Controller model	21
Fig. 4.1 Schematic diagram of HILS system	22
Fig. 4.2 Configuration of HILS system	23
Fig. 4.3 PXIe-8840	25
Fig. 4.4 PXIe-6341	26
Fig. 4.5 SCB-68A	27
Fig. 4.6 Running Matlab	30
Fig. 4.7 Setting of matlab current folder	31
Fig. 4.8 Running Simulink	31
Fig. 4.9 Opening new Simulink window	32
Fig. 4.10 Loading Simulink library browser	32
Fig. 4.11 Searching Simulink blocks	33
Fig. 4.12 Deployment of Simulink blocks into Simulink window	34

Fig. 4.13	Connecting block to other block	34
Fig. 4.14	Setting block parameters	35
Fig. 4.15	Developed 120kW PEMFC simulink model	35
Fig. 4.16	Deployment of NIVeriStand In/Out blocks	36
Fig. 4.17	Setting of model configuration parameters(solver)	37
Fig. 4.18	Setting of model configuration parameters(Code generation)	38
Fig. 4.19	Process of generating file: .dll	39
Fig. 4.20	Trouble shooting of error with block name	40
Fig. 4.21	Trouble shooting of error with bus signal	41
Fig. 4.22	Completion of generaitng file: .dll	42
Fig. 4.23	Wiring of PC and HIL Simulator	43
Fig. 4.24	Connection port of HIL Simulator	43
Fig. 4.25	Running Veristand 2015 sp1	44
Fig. 4.26	Generating new project of veristand	44
Fig. 4.27	Setting of PXI controller	45
Fig. 4.28	Connecting PXI controller with PC(Veristand)	46
Fig. 4.29	Loading file: .dll at Veristand	47
Fig. 4.30	Saving after all process	48
Fig. 4.31	Running Veristand workspace	48
Fig. 4.32	Example of adding dial into workspace	49
Fig. 4.33	Reguating scale of dial	50
Fig. 4.34	Example of adding graph into workspace	51
Fig. 4.35	Running result of veristand	52
Fig. 4.36	Adding channels to Veristand	54
Fig. 4.37	Setting of Analog Input channels	54
Fig. 4.38	Setting of Analog Output channels	55
Fig. 4.39	Selection of Analog Output channels	55
Fig. 4.40	Process of mapping	57

Fig. 5.1 Comparison between the simulated and the measured voltage	59
Fig. 5.2 Comparison between the simulated and the measured power	59
Fig. 5.3 Comparison between the simulated and the measured I-V curve	60
Fig. 5.4 Comparison of model voltage according to various running temperature	62
Fig. 5.5 Comparison of model power according to various running temperature	62
Fig. 5.6 Comparison of model overvoltage according to various running temperature	64
Fig. 5.7 Comparison of model I-V curve according to various running temperature	64
Fig. 5.8 Comparison of model efficiency according to various running temperature	65
Fig. 5.9 Comparison of model voltage according to various fuel/gas supply pressure	67
Fig. 5.10 Comparison of model power according to various fuel/gas supply pressure	67
Fig. 5.11 Comparison of model overvoltage according to various fuel/gas supply pressure	69
Fig. 5.12 Comparison of model I-V curve according to various fuel/gas supply pressure	69
Fig. 5.13 Comparison of model efficiency according to various fuel/gas supply pressure	70
Fig. 5.14 Comparison of model voltage according to various active area	72
Fig. 5.15 Comparison of model power according to various active area	72
Fig. 5.16 Comparison of model overvoltage according to various active area ...	74
Fig. 5.17 Comparison of model I-V curve according to various active area	74
Fig. 5.18 Comparison of model efficiency according to various active area	75

Fig. 5.19	Comparison of model voltage according to various membrane thickness	77
Fig. 5.20	Comparison of model power according to various membrane thickness	77
Fig. 5.21	Comparison of model overvoltage according to various membrane thickness	79
Fig. 5.22	Comparison of model I-V curve according to various membrane thickness	79
Fig. 5.23	Comparison of model efficiency according to various membrane thickness	80
Fig. 5.24	Comparison of model voltage and power according to various thermal mass	82
Fig. 5.25	Comparison of model overvoltage according to various thermal mass	82
Fig. 5.26	Comparison of model I-V curve according to various thermal mass	83
Fig. 5.27	Comparison of model efficiency according to various thermal mass	83
Fig. 5.28	Comparison of running temperature according to various thermal mass	84
Fig. 5.29	Comparison of model voltage and power according to various coefficient of heat transfer to cooling media	86
Fig. 5.30	Comparison of model overvoltage according to various coefficient of heat transfer to cooling media	86
Fig. 5.31	Comparison of model I-V curve according to various coefficient of heat transfer to cooling media	87
Fig. 5.32	Comparison of model efficiency according to various coefficient of heat transfer to cooling media	87
Fig. 5.33	Comparison of running temperature according to various coefficient of heat transfer to cooling media	88
Fig. 5.34	Comparison of voltage and power among model, HIL simulation and experiment	89

List of Symbols

A	: Active area	(cm^2)
a_x	: Gas activity	$(-)$
C	: Heat capacity	(K/J)
E_c	: Open circuit voltage	(V)
F	: Faraday constant	$(-)$
I	: Current	(A)
i	: Current density	(A/cm^2)
NTU	: Number of transfer unit	$(-)$
m	: flow rate	(g/s)
n	: number of mol	$(-)$
P_e	: Power of stack	(kW)
p_{ca}	: Cathode pressure	(Pa)
p_{H_2}	: Hydrogen partial pressure	(Pa)
p_{O_2}	: Oxygen partial pressure	(Pa)
p_{sat}	: Saturated pressure of water	(Pa)
p_v	: Vapor partial pressure	(Pa)
Q	: Calorie	(J)
T_s	: Stack temperature	(K)
t_m	: Thickness of membrane	(cm)
UA	: Overall heat transfer rate coefficient	(W/K)
V_c	: Singel cell voltage	(V)
V_{Act}	: Activation overvoltage	(V)
V_{Ω}	: Ohmic overvoltage	(V)
V_{Con}	: Concentration overvoltage	(V)
y	: Mole fraction	$(-)$
Δp	: Differential pressure	(Pa)
ϵ	: Heat exchanger effectiveness	$(-)$
η	: Efficiency	$(\%)$
λ_m	: Membrane moisture content	$(-)$
μ_f	: Stack fuel utilization rate	$(\%)$
ρ	: Density	(g/m^3)
σ_m	: Membrane ion transfer rate	$(1/\Omega \cdot cm)$

고분자전해질막 연료전지 성능 분석용 모델 및 HILS 시스템 개발에 관한 연구

김 종 인

한국해양대학교 대학원

기관공학부

초 록

환경보호의 중요성이 강조됨에 따라 세계적으로 환경오염에 대한 규제를 강화하고 있으며 오염물질 배출을 전혀 발생시키지 않는 연료전지가 유력한 차세대 동력장치로 주목받고 있다. 다양한 연료전지 중 저온형 연료전지인 고분자전해질막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 작동온도가 80~100℃로 시동 및 운전에 용이하며, 고온형 연료전지에 필요한 내열 재질이 불필요하고 유지/보수 측면에서 유리하다. 또한 부하 변동에 신속한 대응이 가능하다는 장점이 있어 휴대용 기기뿐 아니라 선박과 같은 대용량의 동력장치로서 적합한 특성을 가지고 있다. 하지만 현재까지 상용화된 기술로는 자동차 또는 소형유람선에 적용하는 것 이상으로 대형화하기는 어려우며 실제 운전 데이터가 부족한 실정이다. 따라서 PEMFC의 대형화와 그 적용을 위해서는 충분한 운전 결과, 실험 데이터가 필요한데 시간적, 비용적 문제 때문에 실제 PEMFC 시스템을 구축하여 운전 결과를 얻기 어렵다. 그렇기 때문에 PEMFC 시스템 모델링 및 시뮬레이션을 통한 운전 데이터 축적 및 연구가 필요하다. 일반적인 모델링 및 시뮬레이션은 소프트웨어를 통해서 모델의 운전 데이터를 얻는 방법이며, 시뮬레이션 기법 중 하나인 HILS (Hardware In Loop Simulation) 시스템을 사용하면 실시간으로 운전되는 소프트웨어와 실제 플랜트에서 사용될 하드웨어인 제어기 및 주변기기의 연동을

통해 플랜트를 구축하기 전 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하여 그 손실을 최소화할 수 있다. 또한 소프트웨어와 하드웨어의 연동된 시뮬레이션 데이터 축적이 가능하다. 연료전지 산업과 같은 고비용의 산업에서는 HILS 시스템을 이용하여 연구에 필요한 시간과 비용 절감을 통한 효율적인 개발이 가능하다.

본 논문에서는 대형선박에 PEMFC 시스템 적용을 위한 연료전지 특성 연구를 위해 실제 운전 데이터를 기반으로 한 120kW급 PEMFC 시스템 모델을 개발하고 HILS 시스템을 구축하였다. 모델은 Matlab/Simulink 및 Thermolib을 사용하여 개발하였다. 실제 운전에서 사용된 것과 같은 산소와 수소를 이용하는 모델을 개발하여 운전 데이터와의 비교를 통해 그 신뢰성을 검증하였다. 신뢰성을 바탕으로 모델을 다양한 조건에서 시뮬레이션하여 운전 특성을 확인하였다. 먼저 산소뿐만 아니라 공기를 사용했을 때의 성능 특성을 비교하였으며 스택의 운전온도, 연료/가스 공급압력, 전해질막의 반응면적, 전해질막의 두께의 변화에 따른 각각의 요인이 운전 특성에 주는 영향을 확인하였다. 또한 스택의 열용량과 스택의 냉각매체와의 열전달계수의 변화가 운전 특성에 주는 영향을 확인하였다.

그리고 개발한 Simulink 모델을 활용하여 HILS 시스템을 구축하여 실시간 시뮬레이션을 실행하였다. 실험 데이터와 HILS 시스템 시뮬레이션의 결과 비교를 통해서 HILS 시스템의 실용성을 검증하였다.

실험 데이터와 개발한 모델의 운전 결과 스택 출력 전압의 차이가 최대 1.9%였으며 유사하게 운전되는 것을 확인하였다. 모델 시뮬레이션 결과, Cathode 공급 기체를 산소를 사용하는 경우 스택 전압이 높았으며 작동온도가 높을수록, 연료/가스 공급압력이 높을수록, 전해질막의 반응면적이 넓을수록, 전해질막의 두께가 얇을수록 전압 및 출력이 더 높아지는 것을 확인하였으며 스택의 열용량 및 냉각매체와의 열전달계수의 경우 스택의 출력에 영향을 크게 미치지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 HILS 시스템을 이용한 시뮬레이션의 결과가 실험 데이터와 흡사하다는 것을 확인하여, 실제 120kW PEMFC를 대체하는 실시간 Simulator로써 구축한 시스템의 실용성을 입증하였다.

KEY WORDS: PEMFC 시스템, 모델링, 시뮬레이션, HILS

A study for development of model and HILS system for PEMFC performance analysis

Kim, Jong-in

Department of Marine Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

As the importance of environmental protection is emphasized, regulations on environmental pollution are being tightened around the world, and fuel cells that do not generate any pollutants are seen as the most likely next-generation power plants. Among the various fuel cells, Proton Exchange Membrane fuel cell (PEMFC), which is a low-temperature fuel cell, has an operating temperature of 80 to 100° C, making it easier to start and operate, and is advantageous in terms of materials and maintenance. It also has the advantage of being able to respond quickly to load fluctuations, so it has the appropriate characteristics as a large-capacity power plant, such as a merchant ship. However, technologies that have been commercialized cannot be larger than that are applied to cars or small-sized cruise ships, and lack actual operational data. And it is difficult to obtain the results of operation by deploying the actual PEMFC system due to the time and cost problems that require experimental data, as a result of sufficient operation for the large scale and application of PEMFC. Therefore, it is necessary to accumulate and study operational data through the modeling and simulation of the PEMFC system. Typical

modeling and simulation is the method of obtaining the model's operational data through software, and one of the simulation techniques, the Hardware In Loop Simulation (HILS) system, can identify problems that may occur before the plant is built through the linkage of real-time operating software, controls and peripheral devices that is the hardware to be used in plants. It also enables the accumulation of interlocked simulated data between software and hardware. In high-cost industries such as the fuel cell industry, the HILS system enables efficient development through the time and cost savings required for research.

In this paper, the 120kW PEMFC system model based on actual operation data was developed and the HILS system was established for the study of fuel cell characteristics for the application of the PEMFC system on large ships. The models were developed using Matlab/Simulink and Thermolib. A model using oxygen and hydrogen, such as those used in actual operation, was developed to verify its reliability by comparing it with the experimental data. Based on reliability, the model was simulated under various conditions to confirm the operation characteristics. First, the performance characteristics of air as well as oxygen were compared, and the effect of each factor on the operation characteristics was verified by changes in the operating temperature of the stack, the fuel/gas supply pressure, the reaction area of the electrolyte film, and the thickness of the electrolyte film. The effect of the heat capacity of the stack and the change in heat transfer coefficient with the cooling medium of the stack was also confirmed.

In addition, real-time simulation was carried out by deploying HILS systems using the developed simulink model. The practicality of the HILS system was verified by comparing the experimental data with the results of the HILS system simulation.

As a result of the operation of the experimental data and the model developed, the difference in the output voltage of the stack was up to 1.9% and it was confirmed that it was operated similarly. The model simulation showed that the stack voltage was higher when using oxygen,

when the operating temperature is high, when the reaction area of the electrolyte membrane is large, when the electrolyte film is thin. The heat capacity of the stack and heat transfer coefficients with the cooling medium, it was confirmed that the output of the stack was not significantly affected. The results of simulations using the HILS system were also confirmed to be similar to experimental data, demonstrating the practicality of the system built as a real-time simulator replacing the actual 120kW PEMFC.

KEY WORDS: PEMFC system, Modelling, Simulation, HILS



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

1992년 브라질 리우데자네이루에서 열린 기후 변화에 관한 유엔 기본 협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 이후 지구 온난화를 막기 위해 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 배출을 제한하려는 노력을 지속하고 있다. 또, 기후변화협약 가입국 간의 이에 대한 주요 내용을 정의한 교토의정서를 통해 의무적으로 온실가스 배출량을 제한하고 있다[1].

선박의 경우 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 1973년에 제정한 해양오염방지협약(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78)의 제VI부속서 형태로 선박 대기오염물질 배출규제협약을 체결하였으며 이후 IMO 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)를 통해 온실가스의 배출량을 제한하고 있다 [2]. 대기오염물질 배출을 줄이기 위해 현존선의 에너지효율을 높이는 방안, 선박의 속도를 제한하는 방안, 선박의 연료유에 대한 제한을 제정하는 방안 등이 제안되고 있다. 이러한 방법으로 대기오염물질 배출량을 줄이는 것은 가능하지만 배출량 제로로 만드는 것은 불가능하다.

위와 같은 사회적 요구를 충족시키기 위한 동력장치로써 대기오염을 유발하지 않는 연료전지가 주목받고 있다. 연료전지는 수소와 산소의 반응을 통해 화학에너지를 전기에너지로 변화시키는 특징을 가지고 있다. 현재 선박의 주 동력원인 내/외연기관의 경우 화석연료가 연소되어 대기오염물질인 SOx, NOx, CO2 및 기타오염물질이 발생하지만 연료전지의 경우 주 연료가 수소이기 때문에 연소생성물로 대기오염 요소가 발생하지 않는다는 장점이 있다. 또한 연료전지의 경우 내연기관보다 효율이 더 높기 때문에 더욱 경제적이다.

연료전지 중 PEMFC는 다른 연료전지에 비해 운전온도가 높지 않고 시스템의 구성이 단순하여 무게와 부피에 비해 높은 출력을 기대할 수 있어 유럽에서는 이미 내륙용 소형유람선의 주동력장치로 PEMFC를 탑재하여 사용하고 있다

[3]. 국내에서도 20m 길이의 소형 PEMFC 선박이 개발 및 실증실험을 완료하였다[4]. 현재까지 진행된 연료전지의 실증은 소형선박에 한정되어 있어 일반 상선과 같은 대형선박에 연료전지 탑재를 위해서는 더 많은 정보와 자료가 필요하다.



1.2 연구 목적 및 방법

대형선박에 연료전지 적용을 위해서는 소형 연료전지 선박에 대한 실증이 선행되어야 하는데, 그 이전에 필요한 것이 데이터 확보를 위한 시뮬레이션이다. 다양한 조건 및 용량의 연료전지에 대한 실험 및 연구가 진행되고 있으나 대부분이 대형선박을 목표로 하지 않는다[3].

본 연구에서는 대형선박에 연료전지 적용을 위해 실험데이터를 기반으로 한 120kW급 PEMFC 모델을 개발하였으며 모델을 다양한 조건에서 운전하여 그 결과와 특성을 분석하고자 하였다.

또한 모델을 통한 시뮬레이션 분석뿐만 아니라 실시간 시뮬레이션이 가능한 HILS 시스템 구축 및 연료전지 모델과의 비교를 통하여 실제 시스템인 플랜트를 대체하는 실시간 Simulator로써 HIL Simulator의 실용성을 검증하고자 하였다.

본 연구는 Mathworks사의 Matlab/Simulink 프로그램 및 Thermolib을 활용하여 120kW급 PEMFC 시스템 모델을 개발하였다. 120kW급 PEMFC 스택의 경우 실험 데이터와 모델을 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였으며 스택의 운전온도, 연료의 공급압력, 스택의 반응면적, 전해질막의 두께, 스택의 열용량 그리고 스택의 냉각매체와의 열전달계수를 조건으로 변경하며 해당 스택 및 시스템의 운전 특성에 관하여 연구하였다.

HILS 시스템은 내셔널인스트루먼트(National Instruments, NI)사의 하드웨어 PXI와 소프트웨어 Veristand로 구축하였으며 개발한 시스템 모델을 PXI에 이식하여 운전한 결과를 실험 데이터, 모델과 비교하였다.

제 2 장 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC) 및 HILS 시스템

2.1 개요

다양한 연료전지 중 PEMFC가 주목받는 이유는 먼저 오염물질을 배출하지 않기 때문이고 작동 온도가 낮아 초기시동 및 정상운전 상태까지의 조건 조성이 수월하기 때문이다. 고가의 촉매가 필요하며 촉매 관리를 위한 적정 수준의 CO 유지, 적절한 수분관리가 필요하고 상대적으로 스택 자체 역시 고가라는 단점이 있지만 선박에서 사용해야 한다는 점에 주목해봤을 때 고온형 연료전지인 용융 탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)나 고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)보다는 운전 조건이 안정적이며 유지, 보수가 수월하다. 또한 급격한 부하 변동에도 빠른 추종이 가능하다. 장기적으로 PEMFC의 운전 용량이 고온형 연료전지와 같이 대형화가 가능하다면 그 사용 영역이 더욱 확대되어 대형선박에 적용하기 더 적합한 연료전지로 판단된다[5].

HILS 시스템은 실시간 운전 모델과 제어를 연동하여 실제 플랜트를 대신하는 시뮬레이션의 한 방법이다. PEMFC의 운전 Data를 얻기 위한 방법으로는, 실제 PEMFC 및 주변기기를 구성하여 원하는 조건을 입력하여 운전 결과를 얻는 것이 가장 정확한 방법이지만 시간과 경제적인 여건이 충분치 못한 것이 현실이다. 따라서 실증 데이터를 기반으로 한 모델 제작 및 시뮬레이션을 통한 해당 모델의 실시간 운전 상태의 확인이 가능하며 운전데이터를 얻는 것이 가능한 HILS 시스템이 연료전지 시스템을 분석하기에 유용하며 차후에는 필수적인 요소로 도입이 되어야 한다고 판단된다.

2.2 PEMFC의 특성

PEMFC는 1960년대 Gemini 우주선에 전기와 물을 공급하는 특수한 목적을 위한 연료전지로 개발 및 사용되었으며 이후 알칼리형 연료전지(Alkaline Fuel Cell, AFC)의 활용기대치가 높아지며 관심에서 멀어졌다. 이후 연료전지에 대한 기대와 관심이 커짐에 따라 연구가 지속되어 오고 있으며, 전해질 보충 등의 주기적인 관리가 필요한 알칼리형 연료전지, 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)보다 PEMFC가 다방면에 있어서 유망한 연료전지로 주목받고 있다.

PEMFC의 경우 용량이 가변적이므로 필요한 부하에 따라 연료전지의 크기나 구성을 조정하기 용이하며 전해질이 고분자 물질이기 때문에 전해질 관리가 수월하다. AFC 또는 PAFC의 경우 사용시간이 길어질수록 전해질이 증발하여 지속적인 보충이 필요지만 PEMFC의 경우 전해질 증발에 대한 문제가 없다. 또한 설비의 부피대비 높은 효율을 낼 수 있다는 장점이 있다. 연료전지 시스템 전체에 대해서는 고온형 연료전지인 MCFC나 SOFC가 효율이 높을 수 있으나 고온의 조건을 맞추기 위한 예열 과정 및 온도 차에 의한 스트레스, 재료 손상 등을 고려하였을 때, 부하에 따른 설비의 구성에 있어 PEMFC가 훨씬 자유롭다. 뿐만 아니라 낮은 온도에서도 충분히 활용이 가능하며, 배출물질은 물, 수소와 산소 밖에 없다[7].

이러한 PEMFC에도 몇 가지 단점이 있는데, 촉매로 쓰이는 백금 및 시스템을 구성하는 Bipolar plate(양극판), Membrane electrolyte assembly(MEA) 등이 대부분 고가여서 연료전지 자체가 고가라는 점과 적절한 수분관리가 되지 않으면 Flooding 현상에 의해서 효율이 급격하게 떨어진다는 점, 공급 연료의 CO농도가 충분하게 낮지 않을 경우 촉매가 피독현상을 일으켜 자주 교환이 필요하다는 점 등이다.

그렇지만 단점보다 장점이 뚜렷하기 때문에 이미 PEMFC를 이용한 자동차 역시 상용화되었으며 소형선박 및 차후 대형선박에도 적합한 연료전지로 판단된다.

2.3 HILS 시스템의 특성

HILS 시스템은 가상의 모델과 제어시스템을 연동하여 시뮬레이션을 시행하는 실시간 시스템 해석 기법이다.

시스템 개발 단계에서 모델링을 통한 시뮬레이션은 선택이 아닌 필수적인 상황이 되었다. 시뮬레이션을 통한 시스템 시험이 가져다주는 이익이 확연하기 때문이다. 초기 단계의 시뮬레이션의 경우, 시스템의 스펙과 유사한 모델을 개발한 후 해당 모델에 대한 정보를 얻는 것 정도가 전부였다면 이제는 해당 모델을 시험플랫폼에 이식하여 실시간으로 구동되는, 하나의 가상 시스템을 구축하여 실제로 모델이 운전되고 있는 상황을 구현한다. 여기에 필요한 주변기기 및 제어기는 실제 시스템과 동일하게 구현 및 연동하여, 구비하기 쉽지 않은 고가의 기기 또는 극한 상황에 대한 시험을 반복적으로 시행하기 어려운 플랜트를 모델링을 통해 실시간 운전되는 시험플랫폼으로 운용하는 소프트웨어와 주변기기와 제어기 등의 하드웨어의 연동한 시뮬레이션이 바로 HILS 시스템이다.

이러한 HILS 시스템을 사용하면 플랜트를 실제 구현하여 테스트를 진행하는 것보다 월등한 경제적, 시간적 이익을 확보할 수 있다. 또한 발생할 수 있는 각종 상황에 대해서 통제가 수월하며 시스템의 분석이 용이하다. 실제 구현이 어려운 상황과 다양한 조건 변경에 따른 데이터를 얻는 것이 가능하며 각종 시험에 대한 안전성을 확보할 수 있다.

이러한 HILS 시스템을 통한 시뮬레이션의 이점 때문에 자동차, 항공기 등의 산업 분야에서는 이미 현업에 사용 중인 시뮬레이션 방법이다. 이후 언급하게 될 연료전지에 대한 연구의 경우, 아직까지 고비용의 산업으로 사실상 실제 시스템을 구현하여 테스트를 지속, 반복하기에는 어려움이 있다. 따라서 이후 연료전지 연구 및 산업에서 HILS 시스템을 이용한 시뮬레이션이 병행될 것으로 판단된다[8].

제 3 장 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC) 시스템 모델링

3.1 전체 시스템 구성

120kW급 PEMFC 시스템 모델링을 위하여 충분한 데이터가 있다면 실험 결과에 유사한 모델을 제작할 수 있겠으나 실험 데이터에서 얻을 수 있는 결과는 부하(Ampere)에 따른 스택의 전압만을 확인하였기 때문에 그에 따라 아래의 식을 통해서 모델링의 기반이 되는 필요요건을 계산하였다.

PEMFC의 출력 계산

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (1)$$

P_e : 전력 (W)

V_c : 단 셀 전압 (V)

I : 전류 (A)

n : 셀 수 (-)

출력에 따른 필요 산소, 수소량 계산

$$O_{2,usage} = \frac{In}{4F} = \frac{P_e}{4 \times V_c \times F} (\text{moles/s}) \quad (2)$$

$$H_{2,usage} = \frac{In}{2F} = \frac{P_e}{2 \times V_c \times F} (\text{moles/s}) \quad (3)$$

F : 패러데이상수(-)

식(2), (3)을 통해서 부하 변동에 따라 필요한 산소, 수소량을 계산하였다. 각각의 식에 산소와 수소의 분자량인 $28.84 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$, $2.02 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$ 를 곱하여 필요한 연료량을 질량 단위로 정리할 수 있다. 계산된 값을 기반으로 전체 시스템을 구성하였다.

Fig. 3.1은 120kW급 PEMFC 전체 구성을 나타낸다.

스택을 중심으로 산소 탱크, 수소 탱크와 각각의 가습기로 이루어진 연료/가스 공급 시스템, 냉각유체 탱크와 냉각유체 펌프, 냉각유체 냉각용 열교환기로 이루어진 스택 냉각 시스템 그리고 PEMFC 스택으로 이루어진다. 기본 시스템은 이와 같이 산소를 이용하였으나 비교 분석을 위하여 산소가 아닌 공기를 이용한 경우, 공급 탱크를 사용하는 것이 아닌 대기 중에서 직접 공급하는 것으로 구성하였다. 그리고 스택의 온도를 일정하게 유지하도록 PI 제어를 사용하였다.

Fig. 3.2는 전체시스템을 구성한 Simulink 연료전지 모델이다.

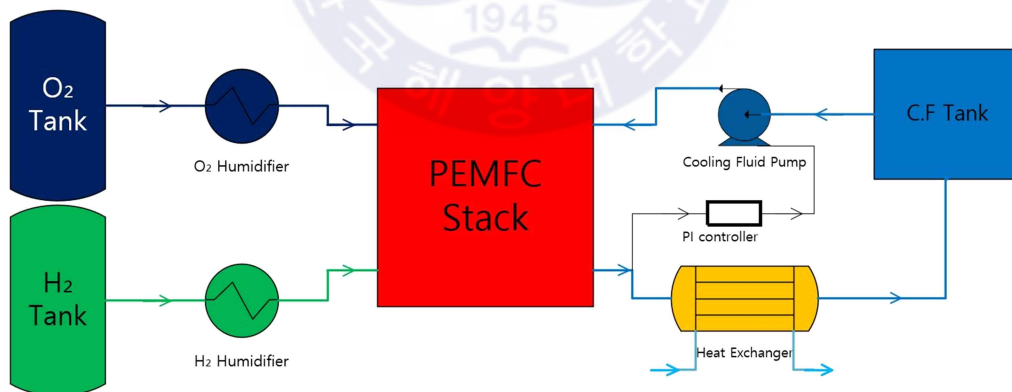


Fig. 3.1 Schematic Diagram of the 120kW PEMFC System

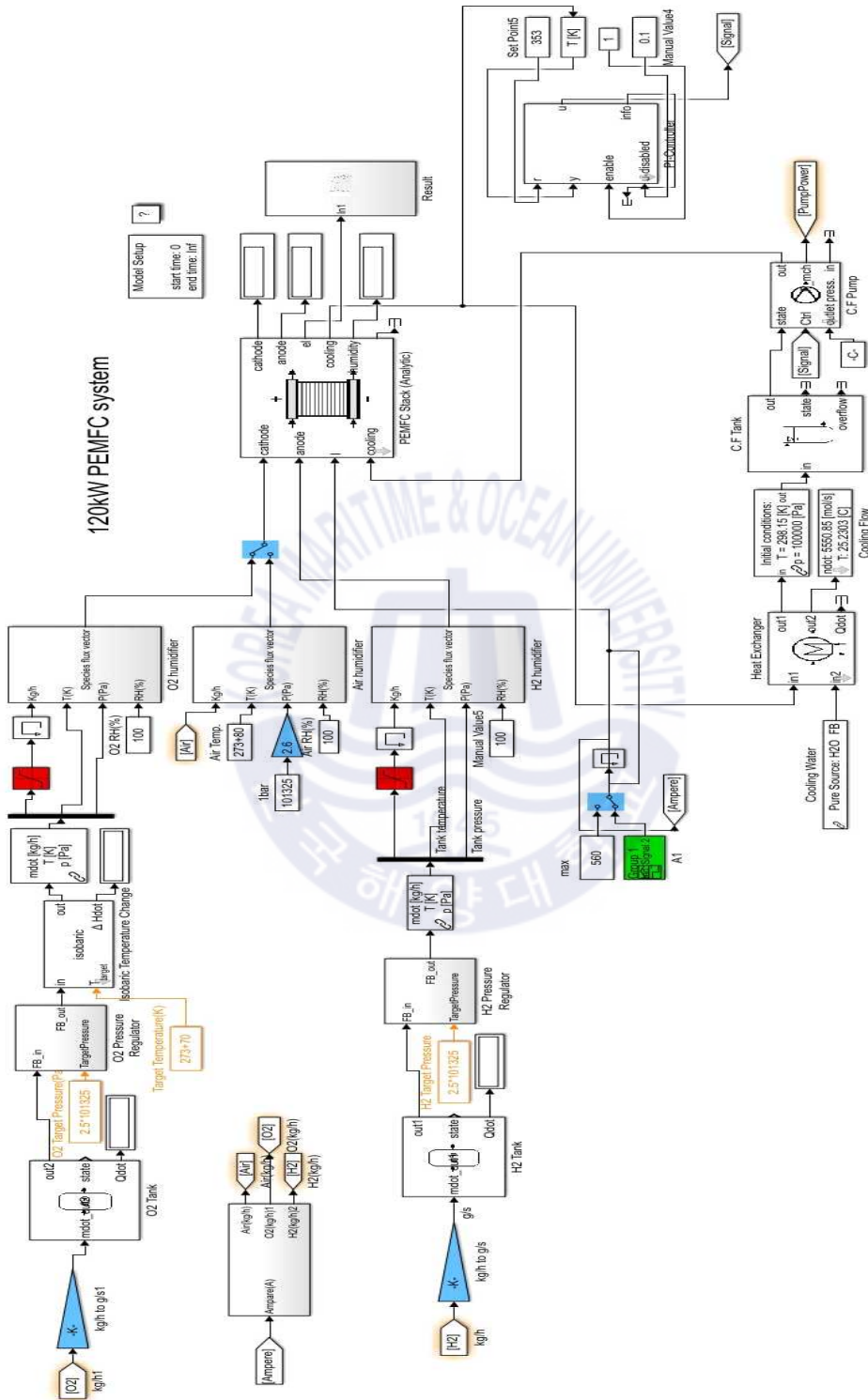


Fig. 3.2 Overall simulink model of 120kW PEMFC system

운전 과정은 다음과 같다.

스택에 입력된 부하(Ampere)의 크기에 따라 필요한 산소, 수소의 양을 계산한다. 그 계산한 양을 각각의 공급 탱크에서 스택 측으로 공급되는 입력값으로 한다. 먼저 산소공급 탱크의 경우 액화산소탱크이며 설정된 압력, 온도의 기체 상태로 상변화를 한 후 가습기로 유입된다. 가습기로 유입된 산소는 유량, 온도, 압력의 상태에 따라 100% 가습이 되어 스택의 Cathode 측으로 공급된다. 산소공급 계통은 Fig. 3.3와 같이 모델링하였다.

수소는 수소 탱크에 저장되어 산소와 마찬가지로 부하의 크기에 따라 계산된 양만큼 탱크에서 스택 측으로 공급한다. 수소는 압축저장방식으로 탱크에 저장되며 고압기체로 저장되기 때문에 탱크 출구에서 감압하여 가습기로 유입된다. 가습기로 유입된 수소는 유량, 온도, 압력의 상태에 따라 100% 가습하여 스택의 Anode 측으로 공급된다. 수소공급 계통은 Fig. 3.4와 같이 모델링하였다.

스택 냉각의 경우 물을 사용하는 것을 기본 조건으로 하였다. 냉각수는 냉각수 탱크에서 공급되며 냉각수 펌프를 거쳐 스택의 Cooling 측으로 공급이 되며, 스택 냉각을 거친 냉각수는 냉각용 열교환기를 거쳐 탱크로 돌아가게 된다. 냉각수 냉각용 열교환기는 물로 냉각을 하였으며 그 공급량은 충분한 것으로 가정하였다. 스택 냉각 시스템은 Fig. 3.5와 같이 모델링하였다.

PEMFC 스택 모델은 Fig. 3.6과 같으며 산소, 수소, 전류(부하), 냉각수를 입력값으로 하여 출력 전압 및 출력 등을 결정하며 Cathode, Anode 출구 측 기체와 출력, 냉각수의 상태 변화와 스택의 습도를 계산한다.

스택의 온도는 냉각수 출구 측의 온도를 기준으로 하였으며 이를 Fig. 3.7의 구성을 통해 PI컨트롤러를 사용하여 조절하였다. 스택의 냉각을 거친 냉각수를 측정값으로 하여 설정값과 비교를 통하여 작동값인 u , Signal을 결정한다.

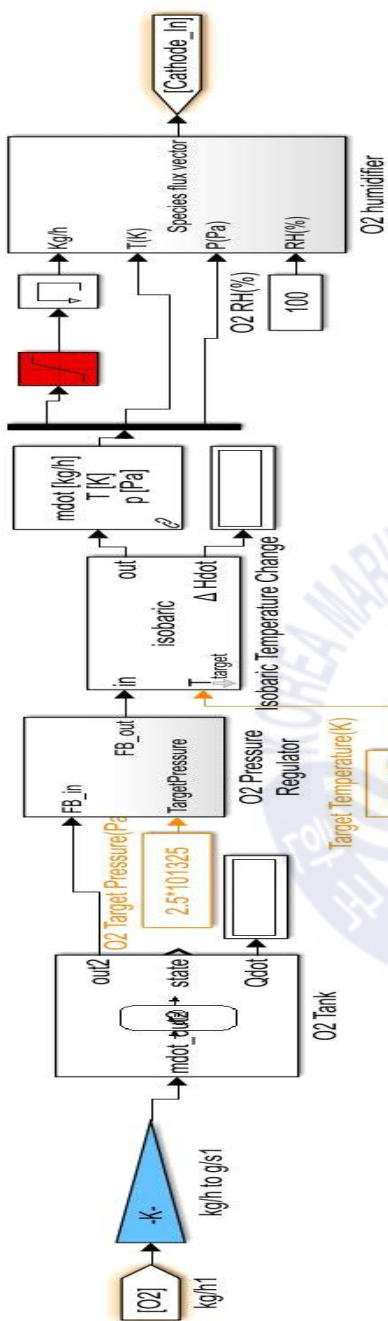


Fig. 3.3 Modeling of Oxygen supply system

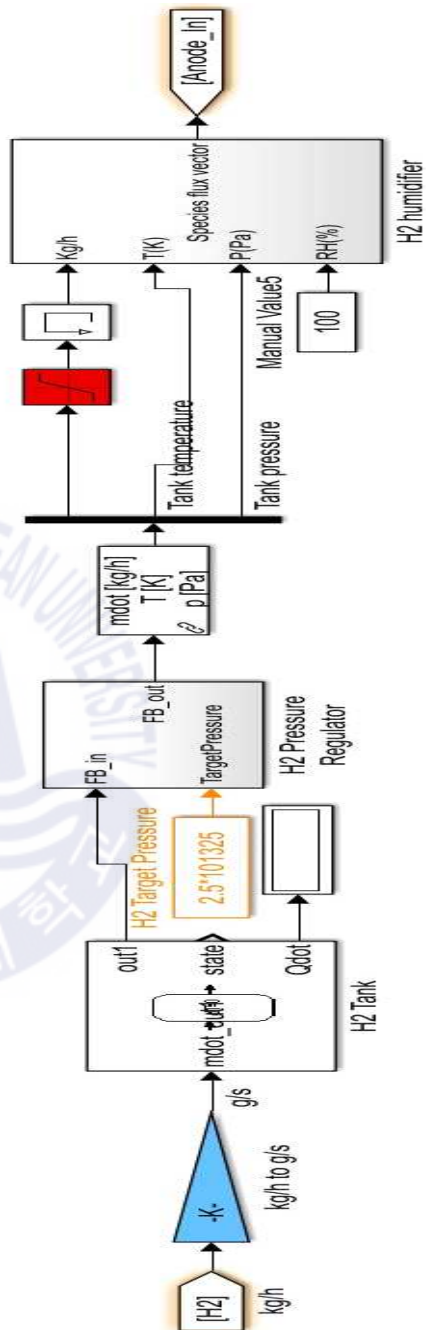


Fig. 3.4 Modeling of Hydrogen supply system

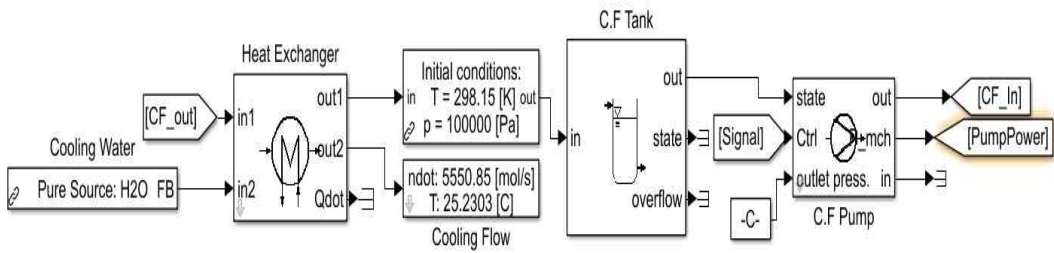


Fig. 3.5 Modeling of Stack cooling system

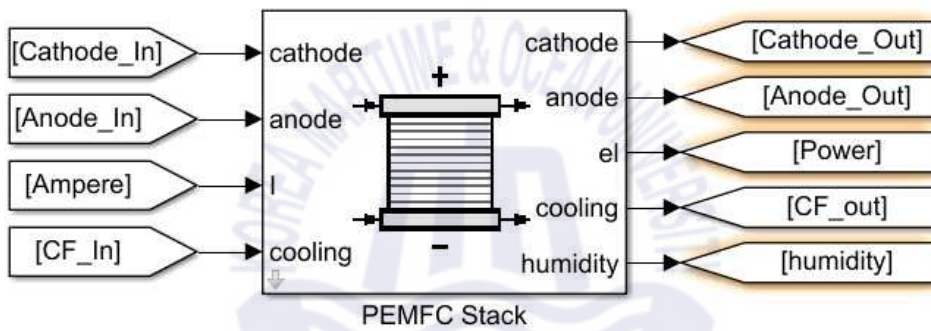


Fig. 3.6 Modeling of Stack

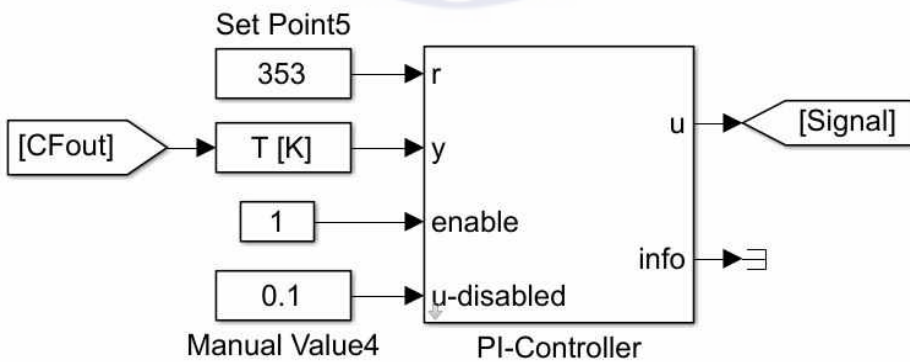


Fig. 3.7 Modeling of PI controller

3.2 시스템 구성 요소 소개

3.2.1 PEMFC 스택

PEMFC 스택은 여섯 부분으로 구성되어 있다. 단 셀 전압 측정, 스택에서의 수소 소모량 계산, 스택의 온도 계산, 냉각수와의 열교환계산, Anode 출입구 연료의 상태 변화 계산, Cathode 출입구 산소의 상태 변화 계산까지 총 여섯 부분이다.

먼저 단 셀 전압 측정 부분은 스택의 한 셀에서 생성되는 전압을 계산하였다. 단 셀 전압은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$V_c = E_c - V_{act} - V_{\Omega} - V_{con} \quad (4)$$

여기서 E_c 는 단 셀에서 발생할 수 있는 최대전압인 개회로전압(Open Circuit Voltage, OCV)이며 V_{act} 는 활성화 손실전압(Activation overvoltage), V_{Ω} 는 저항 손실전압(Ohm overvoltage), V_{con} 는 농도 손실전압(Concentration overvoltage)으로 개회로 전압에서 각각의 손실전압을 빼고 나서 얻을 수 있는 전압값이 단 셀 전압이 된다.

각각의 전압을 계산하는 식은 아래와 같다.

개회로 전압

$$E_c = 1.229 - 0.85 \times 10^{-4}(T_s - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_s \left[\ln\left(\frac{p_{H_2}}{1.01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p_{O_2}}{1.01325}\right) \right] \quad (5)$$

$$p_{H_2} = \frac{(p_{inlet,anode} \times y_{H_2,inlet}) + (p_{outlet,anode} \times y_{H_2,outlet})}{2}$$

$$p_{O_2} = \frac{(p_{inlet,cathode} \times y_{O_2,inlet}) + (p_{outlet,cathode} \times y_{O_2,outlet})}{2}$$

T_s : 스택 온도(K)

p_{H_2} : 수소 분압(Pa)

p_{O_2} : 산소 분압(Pa)

y : 몰분율(-)

활성화 손실전압

$$V_{act} = v_0 + v_a(1 - e^{-10i}) \quad (6)$$

$$v_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4}(T_s - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_s \left[\ln\left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325}\right) \right]$$

$$v_a = (-1.618 \times 10^{-5} T_s + 1.618 \times 10^{-2}) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + (1.8 \times 10^{-4} T_s - 0.166) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-5.8 \times 10^{-4} T_s + 0.5736)$$

i : 전류밀도(A/cm²)

p_{ca} : Cathode 압력(Pa)

p_{sat} : 물의 포화압력(Pa)

저항 손실전압

$$V_{\Omega} = i \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (7)$$

$$\sigma_m = (0.005139\lambda_m - 0.00326) \exp \left[350 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_s} \right) \right]$$

$$\lambda_m = \begin{cases} 0.043 + 17.8a_x - 39.85a_x^2 + 36.0a_x^3, & 0 < a_x \leq 1 \\ 14 + 1.4(a_x - 1) & , 1 < a_x \leq 3 \end{cases}$$

$$a_x = \frac{\left(\frac{p_{v,anode}}{p_{sat,anode}} \right) + \left(\frac{p_{v,cathode}}{p_{sat,cathode}} \right)}{2}$$

$$p_{v,anode} = \frac{(p_{inlet,anode} \times y_{H_2O,inlet}) + (p_{outlet,anode} \times y_{H_2O,outlet})}{2}$$

$$p_{v,cathode} = \frac{(p_{inlet,cathode} \times y_{H_2O,inlet}) + (p_{outlet,cathode} \times y_{H_2O,outlet})}{2}$$

t_m : 전해질막의 두께(cm)

σ_m : 전해질막의 이온전도율($1/\Omega \cdot cm$)

λ_m : 전해질막의 함수율(-)

a_x : 가스의 활동도(-)

p_v : 수증기 분압(Pa)

농도 손실전압

$$V_{con} = i \left(c_1 \frac{i}{2.2} \right)^2 \quad (8)$$

$$c_1 = \begin{cases} (7.16 \times 10^{-4} T_s - 0.622) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T_s + 1.68) \\ \text{for } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) < 2atm \\ (8.66 \times 10^{-5} T_s - 0.068) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.6 \times 10^{-4} T_s + 0.54) \\ \text{for } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) \geq 2atm \end{cases}$$

스택에서의 수소 소모량 계산

수소 소모량은 Anode 측 유입 연료의 몰 수와 부하에 의해 계산된 필요 수소의 몰 수 중 작은 값을 사용한다. 전류(부하)를 통해 필요 수소의 몰 수 계산은 식(3)으로 구한다.

스택의 온도 계산

스택의 온도 계산은 스택에서 받아들인 열량과 유출된 열량의 차이를 스택의 열용량으로 나눈 값으로 구한다.

$$T_s = \frac{(\dot{H}_{an,in} + \dot{H}_{ca,in}) - (\dot{H}_{an,out} + \dot{H}_{ca,out}) + P_e + \dot{Q}_{cooling}}{C_s} \quad (9)$$

$\dot{Q}_{cooling}$: 냉각매체와 교환한 열량(J)

C_s : 스택의 열용량(K/J)

냉각수와 열교환량 계산

냉각수와 스택이 교환한 열량을 계산하며, NTU(Number of transfer unit, 전달단위수)법을 사용하였으며 직교유동(cross flow), 단일 통로 임을 가정하였다.

$$\dot{Q}_{cooling} = \Delta \dot{H} \times \epsilon = (\dot{H}_{cooling, T_{cooling}} - \dot{H}_{cooling, T_s}) \times (1 - \exp^{-NTU}) \quad (10)$$

$$\epsilon : \text{열교환기의 유용도} \left(\equiv \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \right) (-)$$

$$NTU : \text{전달단위수} \left(\equiv \frac{UA}{C_{min}} \right) (-)$$

UA : 열전달계수(-)

C_{min} : 냉각수/스택 중 최소 열용량(K/J)

Anode 입출구 연료의 상태 변화 계산

Anode 출구 측 배기의 상태는 반응에 사용된 수소의 사용량 및 스택의 온도를 기반으로 계산한다. 각 수소의 사용량을 제외한 잔량의 몰 수, 온도, 압력, 변화된 분율을 기반으로 출구 배기 상태를 결정한다.

$$n_{H_2, an, out} = n_{H_2, an, rest}$$

$$T_{an, out} = T_s$$

$$P_{an, in} = P_{an, out}$$

$$y_{an, out} = y_{H_2, rest}$$

Cathode 입출구 산소의 상태 변화 계산

Cathode 출구 측 배기의 상태는 반응을 거치고 난 산소(공기)의 몰 수, 물 분을 및 스택의 온도, 반응한 수소의 수를 기반으로 계산한다. 각 반응한 산소(공기)를 제외한 잔량의 몰 수, 온도, 압력, 변화된 물분율을 기반으로 출구 배기 상태를 결정한다.

$$n_{O_2,ca,out} = n_{O_2,ca,rest}$$

$$T_{ca,out} = T_s$$

$$P_{ca,in} = P_{ca,out}$$

$$y_{ca,out} = y_{ca,rest}$$

스택의 내부 계산과 별도로 스택의 효율 계산은 다음의 식을 사용하였다.

$$\eta = \mu_f \frac{V_c}{1.25} \times 100(\%) \quad (11)$$

μ_f : 스택의 연료이용율(%)

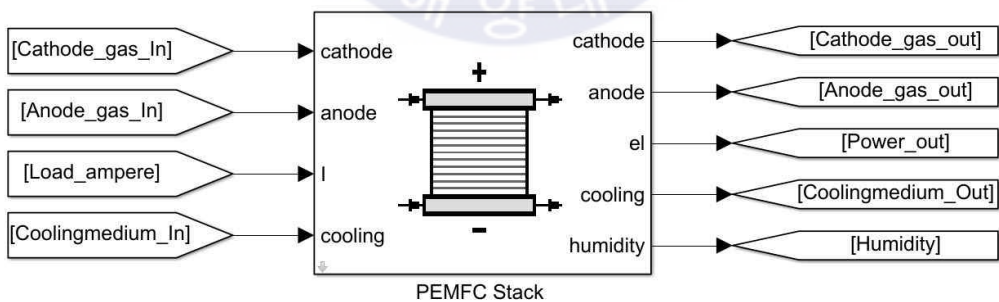


Fig. 3.8 PEMFC Stack model

3.2.2 펌프

펌프의 소모일은 아래 식으로 계산된다.

$$P_{mch} = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho\eta} \quad (12)$$

\dot{m} : 최대 단위 유량(g/s)

Δp : 압력 차(Pa)

ρ : 밀도(g/m³)

η : 펌프의 효율(%)

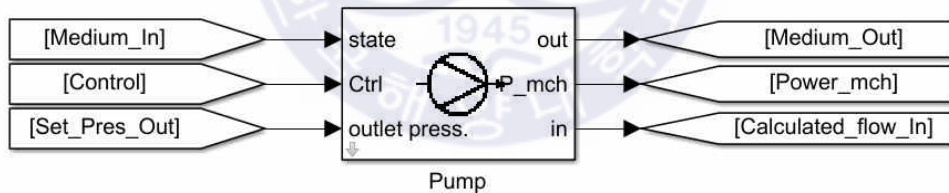


Fig. 3.9 Pump model

3.2.3 열교환기

NTU(Number of transfer unit, 전달단위수)법을 사용하였으며 대향유동(Counter flow), 단일 통로임을 가정하여 교환한 열량을 계산하였다.

$$Q = \epsilon \times Q_{\max} = \dot{C}_{\min} (T_h - T_c) \quad (13)$$

$$\epsilon = \left(\frac{1 - \exp(-N(1-C))}{1 - C \times \exp(-N(1-C))} \right) (\text{대향유동})$$

$$C = \frac{\dot{C}_{\min}}{\dot{C}_{\max}}$$

Q_{\max} : 최대 교환 열량(J)

C_{\min} : 열 교환 유체 중 열용량 최소값(K/J)

C_{\max} : 열 교환 유체 중 열용량 최대값(K/J)

T_h : 열 교환 유체 중 고온 유체의 온도(K)

T_c : 열 교환 유체 중 저온 유체의 온도(K)

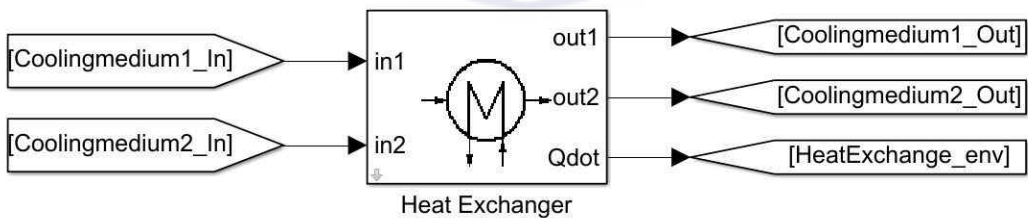


Fig. 3.10 Heat Exchanger model

3.2.4 탱크

모델에 사용된 산소, 수소탱크의 경우 등온탱크(Isothermal tank)이며, 입력된 요구배출량 및 내부물질 종류의 상태인 몰 수, 온도, 압력, 증기분율, 물분율을 계산하여 배출되는 유체의 상태 및 탱크 내부의 상태를 계산한다.

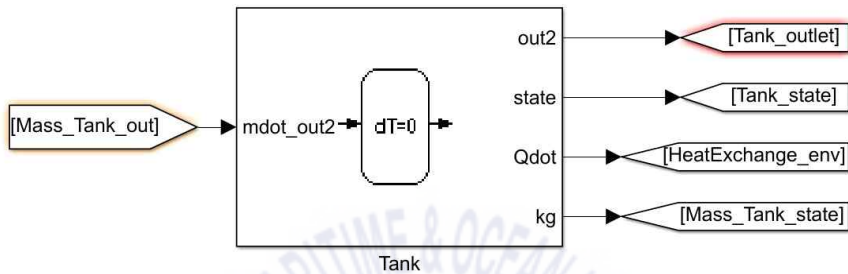


Fig. 3.11 Tank model

3.2.5 PI 제어기

PI 제어기는 설정값(r)과 측정값(y)의 오차를 줄이기 위하여 작동값(u)을 조절한다.

PI 제어기의 보정은 비례이득(K_r) 값에 비례하여 현재의 오류($e=r-y$)를 처리하는 비례 제어와 적분시간(T_n)에 따른 과거의 누적 정보를 통해 오류를 처리하고 신호를 수정하는 적분 제어를 통해 보정 신호를 결정한다. K_r 과 T_n 은 모두 스칼라 값이며 최대값은 1, 최소값은 0으로 한다.

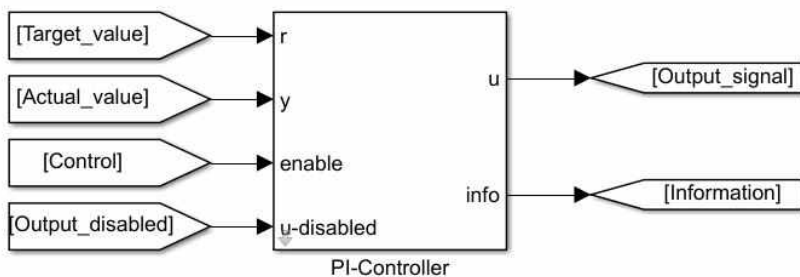


Fig. 3.12 PI-Controller model

제 4 장 HILS 시스템

4.1 HILS 시스템 구성

HILS 시스템은 Fig. 4.1 HILS 시스템 개념도와 같은 구성을 갖는다.

HIL 시뮬레이션은 일반적인 시뮬레이션 방법인 SIL(Software In Loop)과는 다르게 시뮬레이션 시스템 내에 실제 기기 또는 제어기로 이루어진 하드웨어를 결합하는 시뮬레이션 방법이다. 전체 구성 중에서 시뮬레이션에 실제로 사용되기 어려운 Plant를 Fig. 4.1과 같이 HIL Simulator로 대체하여 시뮬레이션을 시행한다[11].

HIL 시뮬레이션 방법을 사용하기 위하여 컨트롤 및 조작에 필요한 Control system, 모델에 근간을 둔 HIL Simulator와 모델의 신뢰성을 입증하기 위한 실제 plant 또는 plant의 운전 결과가 필요하다.

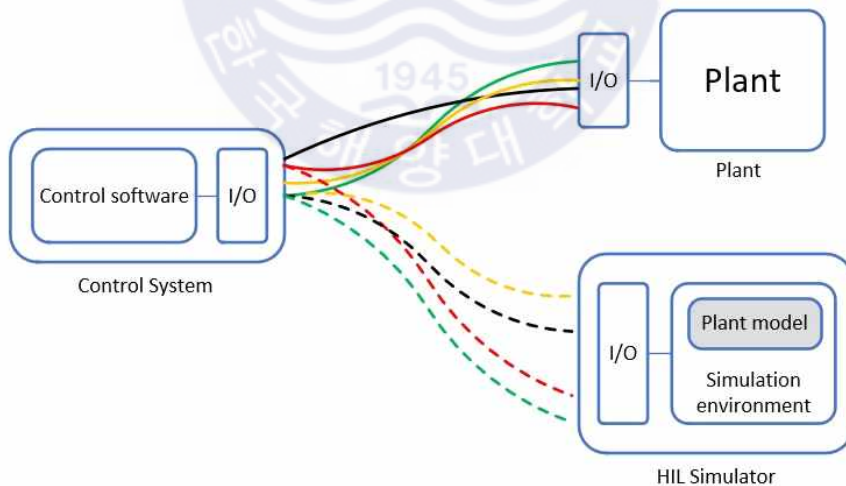


Fig. 4.1 Schematic diagram of HILS system

4.2 HILS 시스템 구성 요소 소개

본 논문에서 구축한 HILS 시스템은 National Instruments 사의 장비를 사용하였으며 그 구성은 Fig. 4.2와 같다. (1)은 Control system인 pc(Laptop), (2)는 모델이 적용되어 운전되는 장비인 HIL Simulator, PXI chassis이며 (3)은 외부 하드웨어와의 입/출력에 필요한 커넥터 블록, SCB-68A이다. 커넥터 블록이 없더라도 chassis를 통한 모델의 구동은 가능하지만 하드웨어와의 연동은 불가능하다. 각 구성 요소의 세부사항은 아래와 같다.

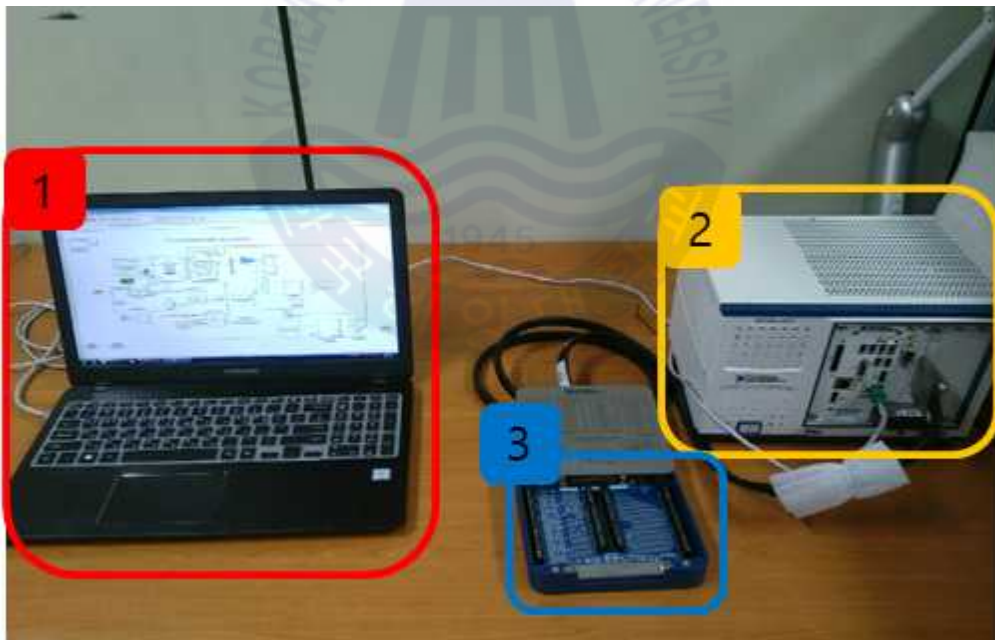


Fig. 4.2 Configuration of HILS system

(1) PC(Laptop) - Control system

각종 소프트웨어를 활용하여 모델 및 코드 제작에 사용되며, HIL 시뮬레이션 모니터링에 이용된다.

운영체제 - Windows 7

모델 및 코드 제작 소프트웨어 - Matlab/Simulink

모델 조정 시뮬레이션 소프트웨어 - Veristand

시뮬레이션 소프트웨어 및 HIL Simulator 사이의 데이터 전달 - TCP/IP 연결

(2) PXI chassis - HIL Simulator

PXI 모듈 수용 역할을 하며 타이밍 및 동기화 기능을 제공한다. 실제로 제작된 모델이 실시간 운전되는 기기이다.

Simulator - PXIe-1084

- ▷ 슬롯 개수 : 18개
- ▷ 시스템 대역너비 : 4 GB/s
- ▷ 슬롯 대역너비 : 500 MB/s
- ▷ 슬롯 냉각 능력 : 58 W
- ▷ 전체 chassis 출력 / 이용 가능 출력 : 800 W / 650 W
- ▷ 운전온도 : 0 ~ 50 °C

PXI chassis의 세부 하드웨어는 아래의 부품으로 구성된다.

1) PXI Controller(PXIe-8840)



Fig. 4.3 PXIe-8840[10]

- ▷ CPU : Intel^(R) Core™ i5 4400E(2.70GHz dual core processor)
- ▷ On-die L2 캐시 : 3 MB
- ▷ 메모리 : 4GB
- ▷ 하드 드라이브 : 250 GB Serial ATA

상기의 스펙을 가진 PXI 임베디드 컨트롤러로 그 자체로 하나의 통합된 컴퓨터 솔루션을 제공한다.

2) PXI 다기능 데이터 입출력 보드(PXIe-6341)



Fig. 4.4 PXIe-6341[10]

- ▷ 채널 수 : 단일 채널 16개 또는 차동 채널 8개
- ▷ ADC resolution : 16 비트

다양한 채널, 샘플 속도, 출력 속도의 I/O를 모델 간 정밀 타이밍, 트리거링, 동기화 기능과 함께 사용가능하다.

(3) 커넥터 블록(SCB-68A)



Fig. 4.5 SCB-68A[10]

DAQ 장치용 I/O 커넥터 블록으로, 외부 하드웨어와 내부 소프트웨어 간의 연결에 이용된다. NI사 68-pin X, M, E, B, S, R 시리즈의 DAQ 장비에 사용 가능하며 2개의 범용 브레드보드 영역이 있다.

4.3 HILS 시스템 구축 과정

본 논문에서 HILS 시스템을 구축하기 위해 사용한 프로그램은 아래와 같다.

- 1) Matlab R2013a
- 2) Simulink
- 3) Visual Studio 2010 sp1
- 4) Thermolib
- 5) Veristand 2015 sp1

Matlab R2013a는 고급 프로그래밍 언어로써 코드, 파일 및 데이터 관리를 개발 환경 뿐 아니라 동적/내장형 시스템의 설계를 위한 환경을 제공한다.

<주요 특징>

- 테크니컬 컴퓨팅용 고성능 언어
- 코드, 파일 및 데이터 관리를 위한 개발 환경
- 반복적인 조사, 설계 및 문제 해결을 위한 대화형 도구

Simulink는 멀티도메인 시뮬레이션 및 모델에 기초한 동적 시스템 및 내장형 시스템의 설계를 위한 환경을 제공한다.

<주요 특징>

- 정의된 블록의 다양하고 확장 가능한 라이브러리
- 직관적인 블록 다이어그램 구성 및 관리를 위한 대화형 그래픽 편집기능
- 모델을 설계 구성요소의 계층으로 분할하여 복잡한 설계 관리 가능

Visual Studio 2010 sp1은 윈도우 프로그램 개발 환경을 제공한다.

<주요 특징>

- 파일 컨텍스트를 유지하며 정확하고 효율적인 코드 작성 가능
- 코드 로그를 통한 디버깅 및 수정 가능

Thermolib은 Matlab/Simulink의 Toolbox로 열역학 및 제어계 설계와 시뮬레이션을 위한 모델링 환경을 제공한다.

<주요 특징>

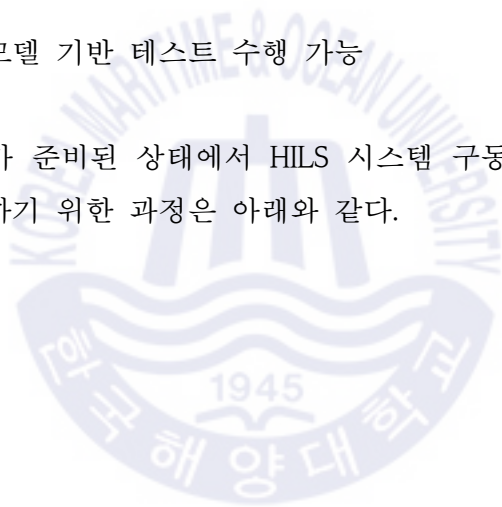
- 자체 Simulink 블록을 포함하며 확장 가능한 열물성 데이터베이스 제공
- 다양한 물질 및 복수 상의 혼합물의 열역학 및 화학반응 계산 제공

Veristand 2015 sp1은 신호 생성, 데이터 수집, 계산된 채널 및 맞춤형 채널 스케일링 등의 Real-Time 테스트를 위한 소프트웨어이자 HIL 테스트 임베디드 (embedded) 소프트웨어이다.

<주요 특징>

- 물리적 시스템의 모델 기반 테스트 수행 가능

상기의 소프트웨어가 준비된 상태에서 HILS 시스템 구동 파일인 .dll 파일 제작과 시스템을 운전하기 위한 과정은 아래와 같다.



① .dll 파일의 기본이 되는 연료전지 모델을 제작하는 과정이 선행되어야 한다. 다음은 Matlab/Simulink 연료전지 모델을 제작하는 과정이다. Matlab R2013a 아이콘을 더블클릭하여 프로그램을 실행하여 Matlab 창을 연다.

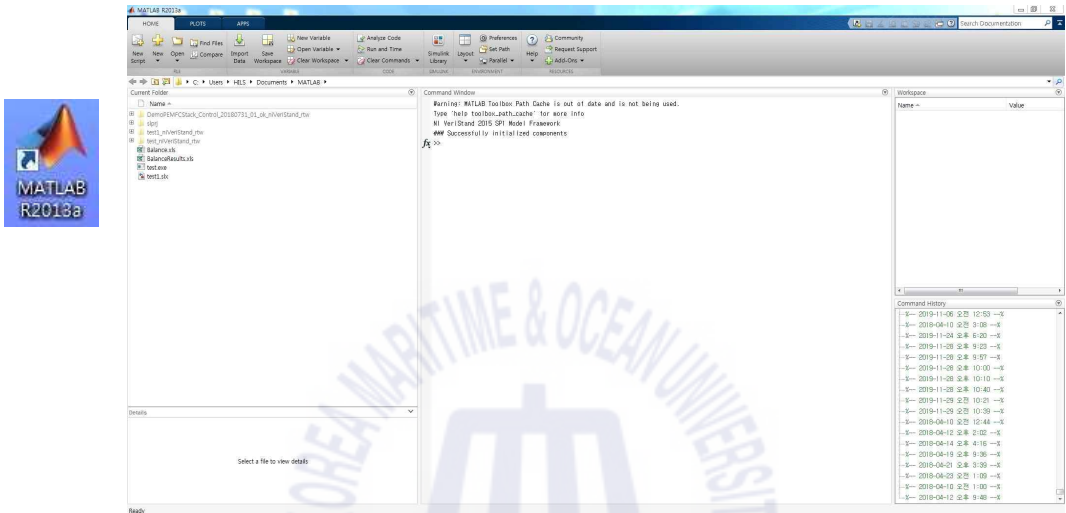


Fig. 4.6 Running Matlab

② ‘Browse for folder’ 아이콘을 클릭하여 현재 작업 폴더 위치를 바탕화면으로 설정한다. 현재 작업 폴더가 관리자 권한이 있어야 접근할 수 있는 폴더일 경우 .dll 파일 제작 과정 중 에러가 발생하게 된다.

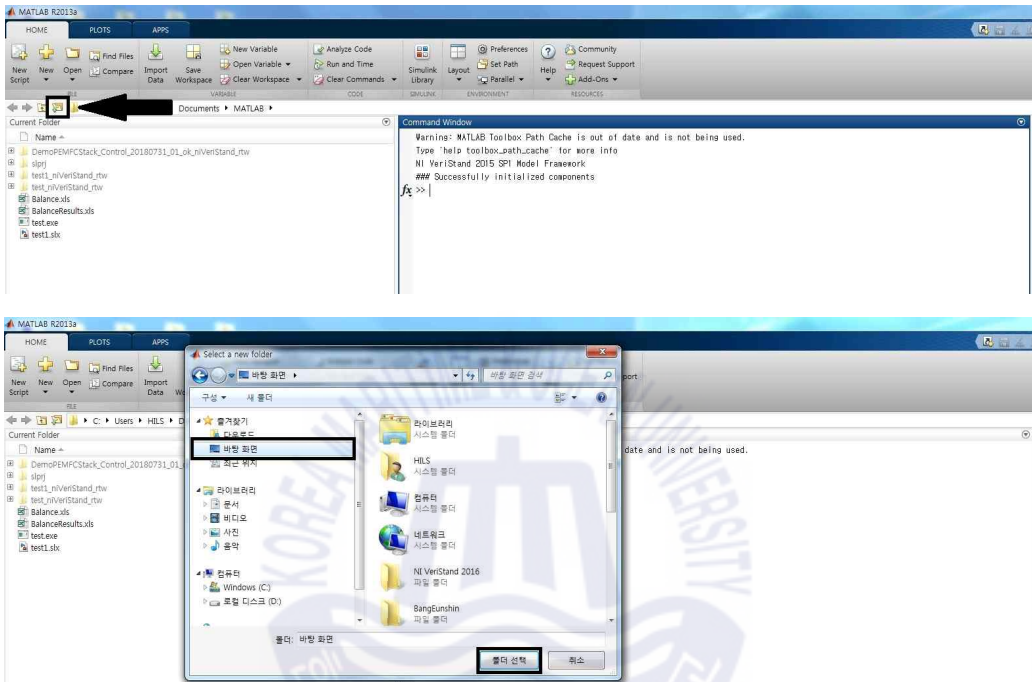


Fig. 4.7 Setting of matlab current folder

③ 현재 작업 폴더의 위치가 바탕화면으로 바뀐 것을 확인한 후 Simulink Library 버튼을 누른다.

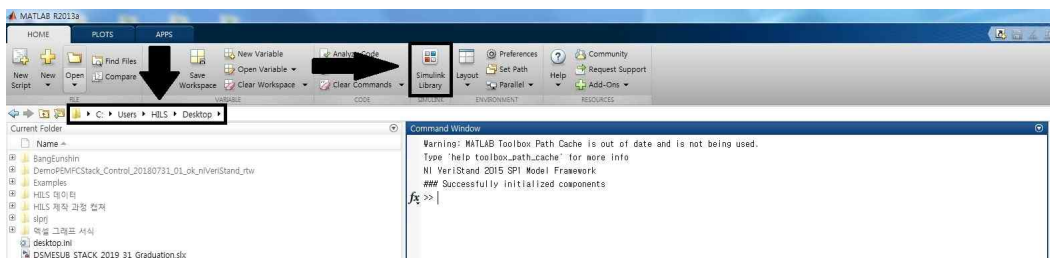


Fig. 4.8 Running Simulink

④ Simulink Library Browser 창이 뜨면 좌측 상단의 ‘New model’ 버튼을 눌러 새 Simulink 창을 실행한다.

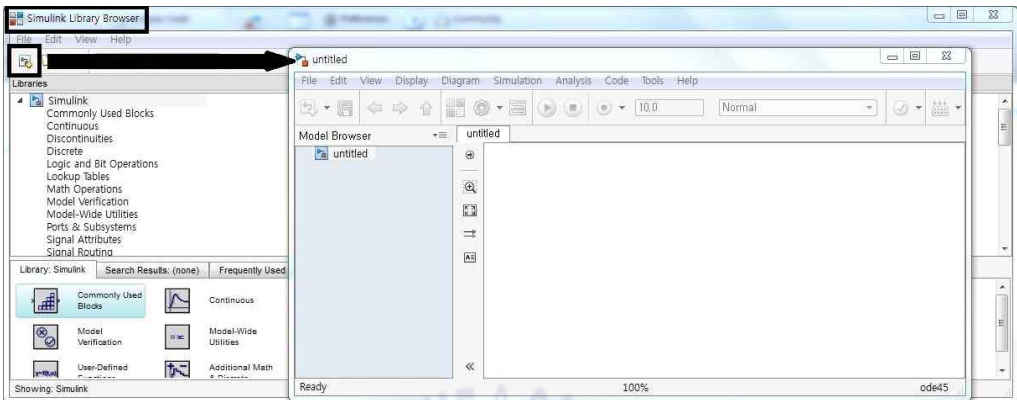


Fig. 4.9 Opening new Simulink window

⑤ Simulink 창이 뜨면 Library Browser 버튼을 클릭하여 Simulink Library Browser를 실행한다.

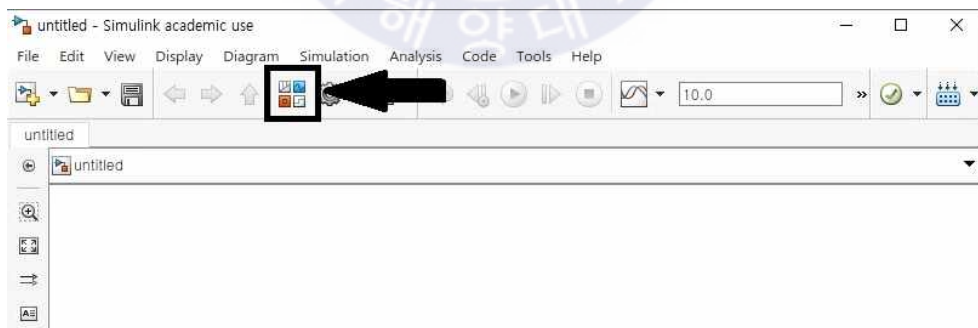


Fig. 4.10 Loading Simulink library browser

⑥ Simulink Library Browser 창이 뜨면 좌측 상단의 검색 창을 이용해 사용하고자 하는 블록을 찾거나 좌측 하단의 목록에서 직접 블록을 찾는다.

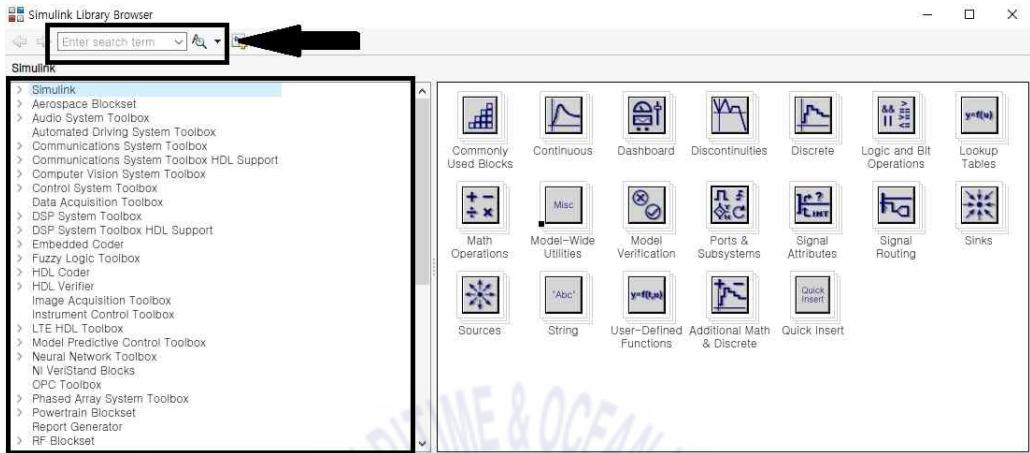
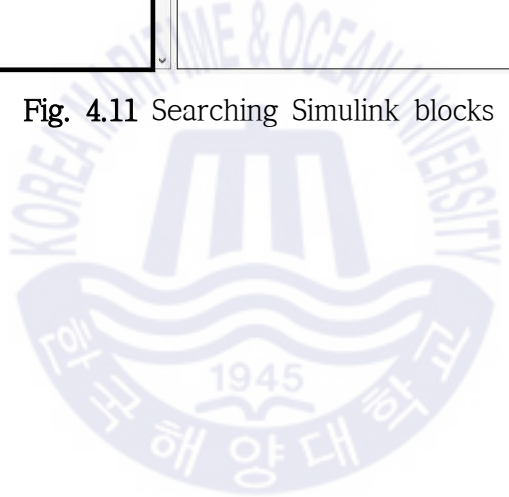


Fig. 4.11 Searching Simulink blocks



⑦ 원하는 블록을 찾았다면 해당 블록을 마우스 우클릭하여 ‘Add block to model (file name)’ 버튼을 클릭하거나 Simulink 창으로 드래그하여 해당 블록을 적용한다.

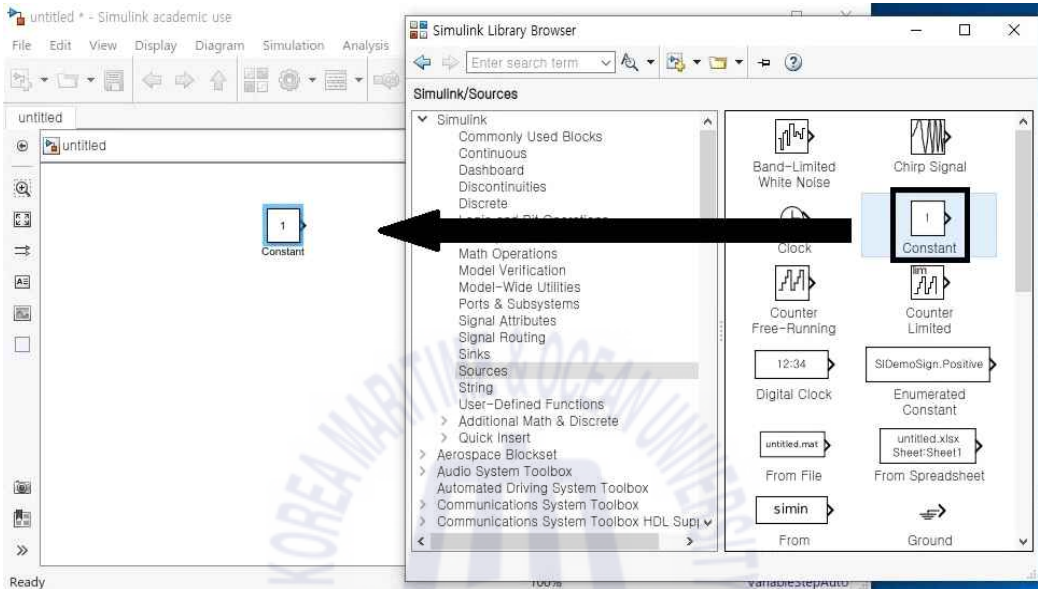


Fig. 4.12 Deployment of Simulink blocks into Simulink window

⑧ 불러온 블록들을 연결할 시 블록에서 나가는 방향의 화살표를 클릭하여 연결하고자 하는 블록의 들어가는 방향 화살표까지 드래그한다.

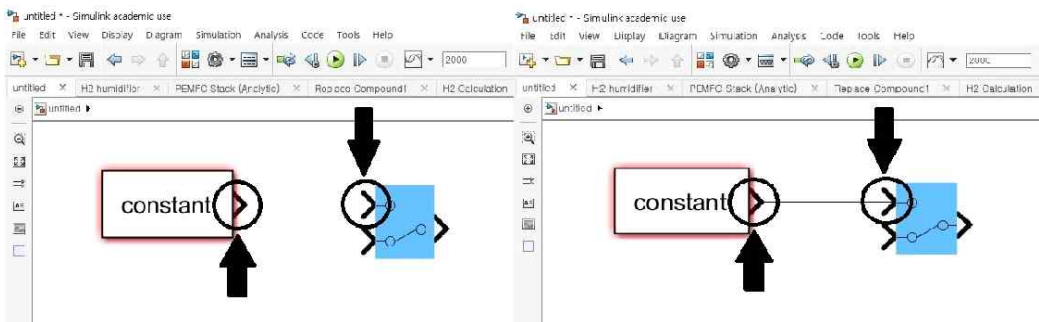


Fig. 4.13 Connecting block to other block

⑨ 각 블록에 대한 정보를 보거나 파라미터를 조정하려면 해당 블록을 더블 클릭하여 Block Parameters 창을 열어 필요한 작업을 시행한다.

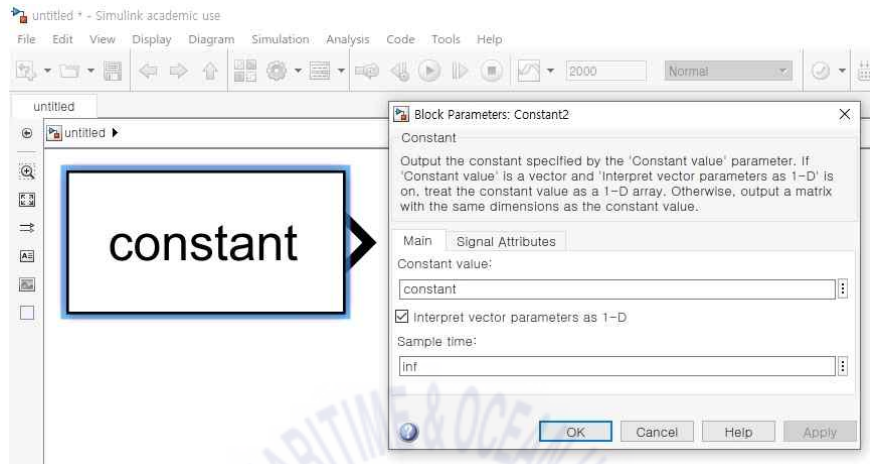


Fig. 4.14 Setting block parameters

⑩ 상기의 방법으로 필요한 블록을 불러와서 각 모델 및 120kW급 PEMFC 시스템 모델을 제작한다. 제작이 완료되면 상단의 ▶ 버튼을 눌러 정상적인 시뮬레이션의 작동 여부를 확인한 후 저장한다.

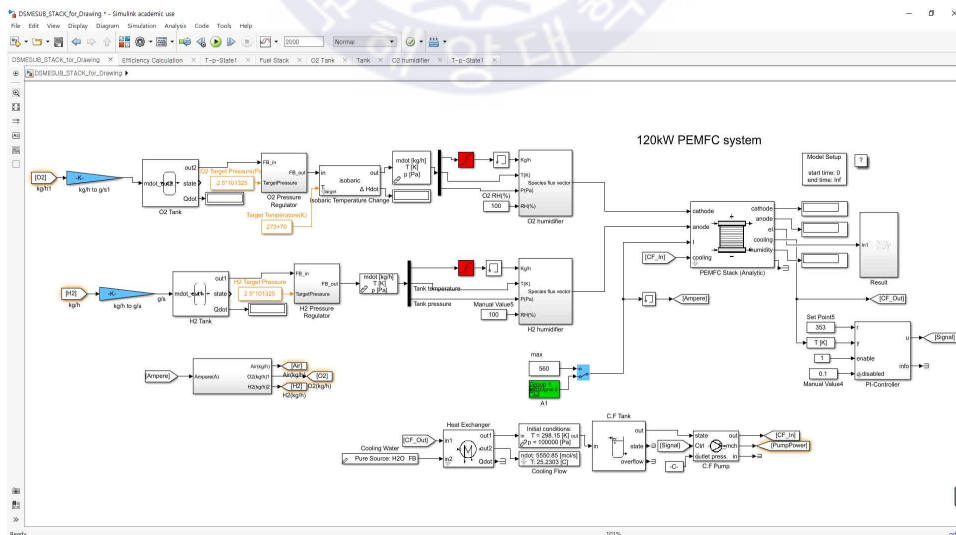


Fig. 4.15 Developed 120kW PEMFC simulink model

① 제작이 완료된 모델은 HIL Simulator에 데이터를 입력 또는 출력할 곳을 정하기 위해 NIVeriStand 블록을 추가해야 한다. 해당 블록은 Simulink library - NI VeriStand Blocks 항목에서 찾을 수 있다.

<NIVeriStand In>은 HIL Simulator에 입력값이 되는 블록이며 <NIVeriStand Out>은 HIL Simulator에서 시뮬레이션된 결과값을 얻는 블록이다. <NIVeriStand In>은 PEMFC 스택의 부하인 전류값, <NIVeriStand Out>은 PEMFC 스택의 출력값에 연결한다.

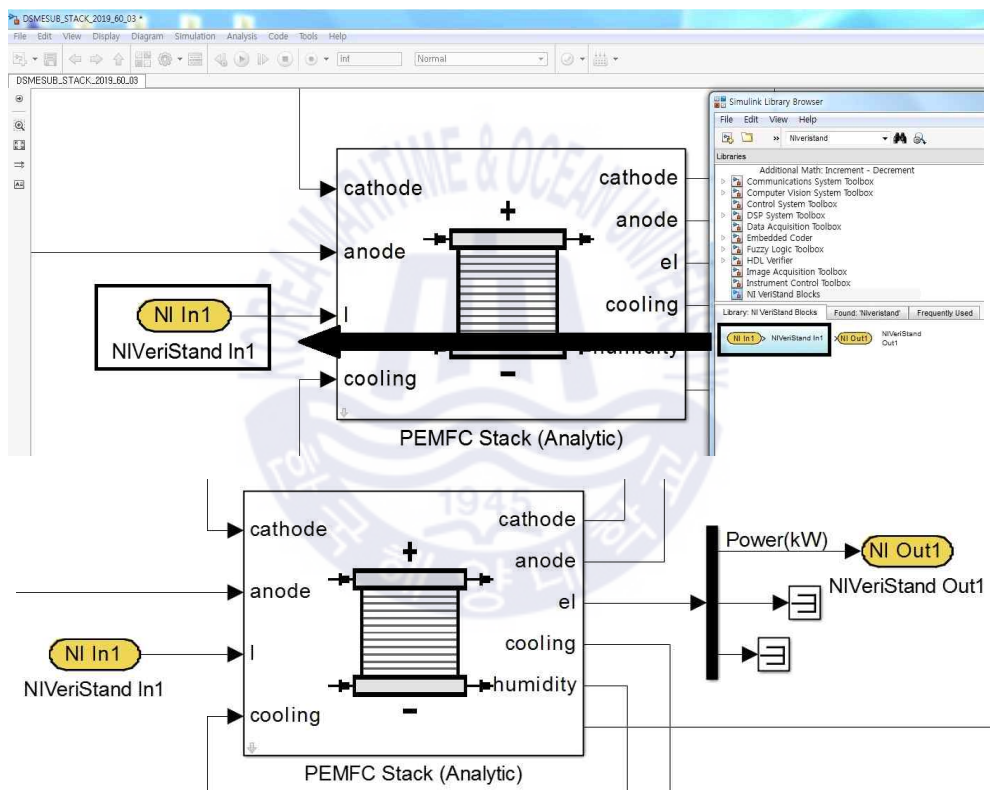


Fig. 4.16 Deployment of NIVeriStand In/Out blocks

⑫ 다음은 모델을 HIL Simulator에서 구동하기에 적합한 상태로 세팅을 한다.
Model configuration parameter - Solver 창을 열어서 필요값을 조정한다.

㉔ Simulation time - Stop time : inf

시스템의 시뮬레이션 시간을 설정하는 부분으로, inf를 입력할 경우 에러가 발생하지 않는 한 시뮬레이션이 멈추지 않는다.

㉕ Solver options - Type : Fixed-step

시뮬레이션의 계산을 진행하는 시간 간격을 일정하게 설정하는 것으로 HIL Simulator는 Fixed-step으로만 운전이 가능하다.

㉖ Solver options - Solver : 필요한 Solver 설정

계산의 방식을 결정하는 항목이다.

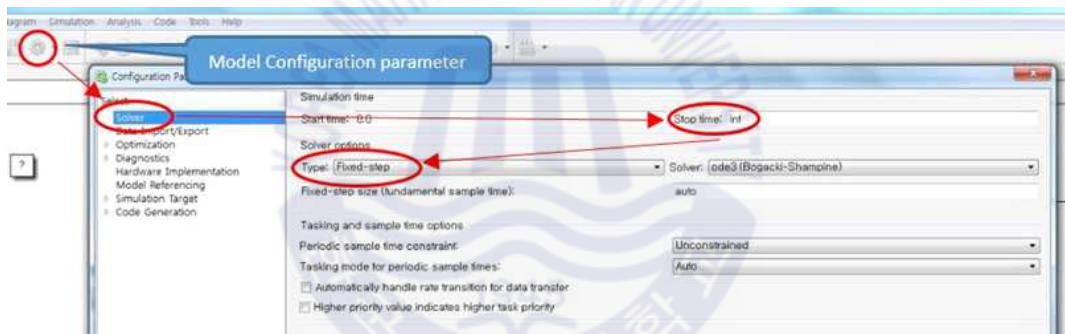


Fig. 4.17 Setting of model configuration parameters(solver)

⑬ 다음은 .dll 파일을 제작하기 위한 세팅을 한다. Model configuration parameter - Code Generation 창을 열어서 필요값을 조정한다.

㉗ Target selection - System target file : NIVeriStand.tlc

System target file은 사용하려고 하는 프로그램에 따라서 달라지므로, Veristand를 윈도우 운영체제에 사용하기 위한 NIVeriStand.tlc를 선택한다.

㉘ Target selection - Language : C++

C 또는 C++ 언어를 선택할 수 있으며, 여기서는 C++ 언어를 사용하였다.

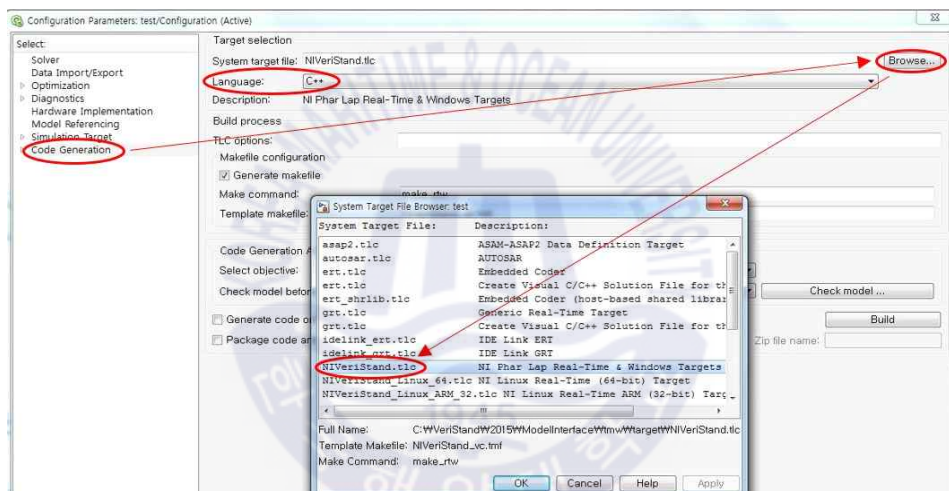


Fig. 4.18 Setting of model configuration parameters(Code generation)

⑭ Build 버튼을 눌러서 .dll 파일을 제작한다.

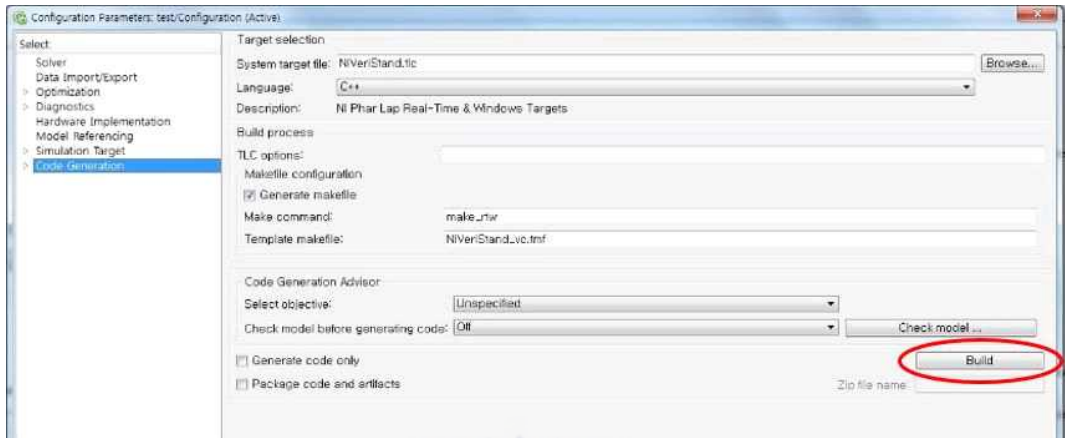
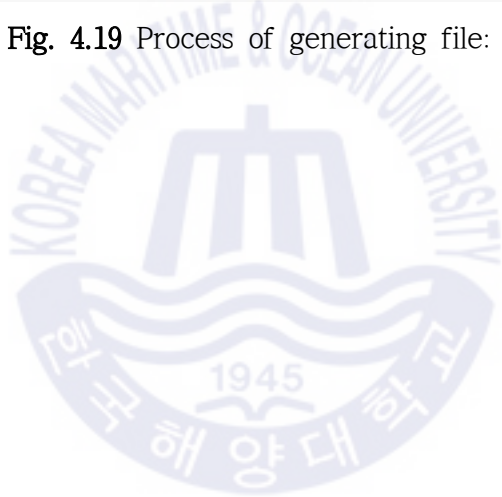


Fig. 4.19 Process of generating file: .dll



※ .dll 파일 제작 중 아래와 같은 에러 발생시, Thermolib의 Block 중 공백이 있는 경로 이름이 포함된 부분을 찾아서 임의의 이름을 입력하여 아래처럼 수정한다.

1. Error의 내용 중 다음 문장 “~ The name cannot start or end with / character.” 을 확인한다.
2. 모델의 Model Setup Block 우클릭, Mask - Look Under Mask 선택하면 Block 내부로 화면이 변경된다.
3. 내부화면 “simulation control“이 떠있는 상태에서 상단의 Model Explorer를 클릭하여 해당 창을 띄운 후 Block 이름이 지정되어있지 않은 Block의 이름을 임의 지정한다. 이름은 공백, 한글을 포함하지 않아야 한다.
4. 이름 없던 Block의 이름을 임의로 입력한 후 Model Explorer 창을 닫는다.
5. 다시 .dll 파일을 제작한다.

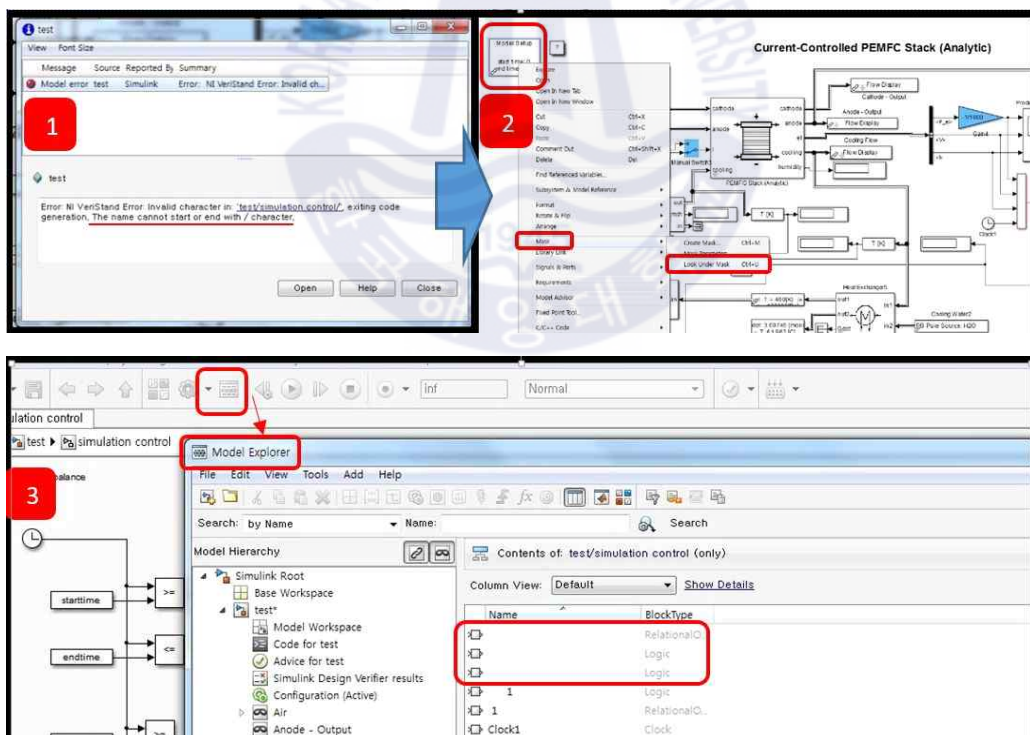


Fig. 4.20 Trouble shooting of error with block name

※ Model에 사용된 Block 중 Bus signal이 포함되었을 경우 아래와 같은 Error가 발생할 수 있으며, 해당하는 부분을 아래처럼 수정한다.

1. Error의 내용 중 다음 문장 “Cannot propagate bus signal from ~.”을 확인한다.
2. 해당하는 port의 한 line에서 출력되는 data의 수가 한 가지가 될 수 있도록 bus signal을 분리 혹은 또는 해당 부분을 삭제한다.
3. 다시 .dll 파일을 제작한다.

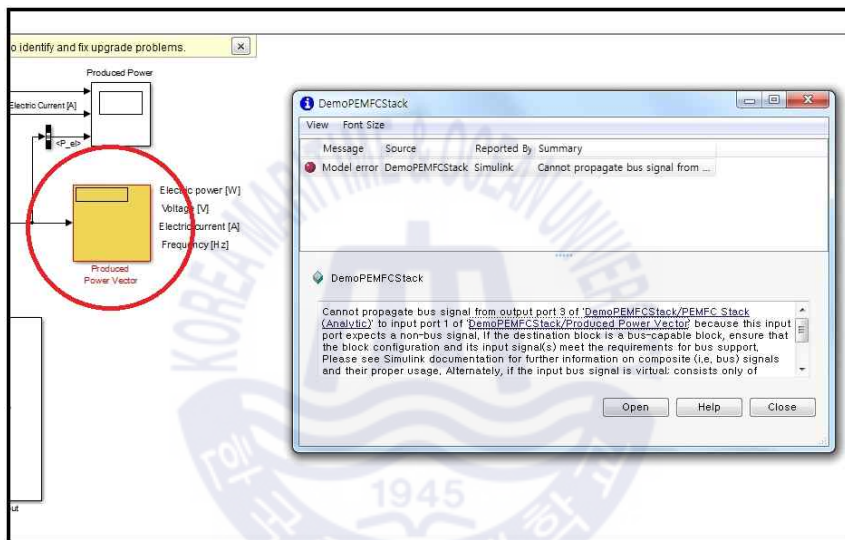


Fig. 4.21 Trouble shooting of error with bus signal

⑮ 정상적으로 .dll 파일 제작이 완료되면 Matlab Command 창에서 다음과 같은 화면을 확인할 수 있다. 파란색으로 표시된 파일 이름을 클릭하면 파일이 만들어진 폴더가 열리게 되며 폴더 내부에 (파일이름).dll 파일이 제작되어 있음을 알 수 있다.



이름	수정된 날짜	유형	크기
rtGetNaN.obj	2018-10-18 오후...	Object File	1KB
rtGetNaN.cpp	2018-10-18 오후...	C++ Source	3KB
rtGetNaN.h	2018-10-18 오후...	C/C++ Header	1KB
rtGetNaN.obj	2018-10-18 오후...	Object File	1KB
rtmodel.h	2018-10-18 오후...	C/C++ Header	1KB
rtw_proj.tmw	2018-10-18 오후...	TMW 파일	1KB
rtwtypes.h	2018-10-18 오후...	C/C++ Header	18KB
rtwtypeschsum.mat	2018-10-18 오후...	MATLAB Data	2KB
test.cpp	2018-10-18 오후...	C++ Source	1,250KB
test.dll	2018-10-18 오후...	응용 프로그램 확장	813KB

Fig. 4.22 Completion of generating file: .dll

⑯ 다음은 HIL Simulator, PXI Controller(PXIe-8840)에 제작한 .dll 파일을 이식하는 과정이다. 먼저 PC와 HIL Simulator를 연결한다. 일반 LAN 케이블을 사용하며 Fig. 4.24의 중간의 port에 연결한다. Fig. 4.24의 위쪽 port는 커넥터 블록인 SCB-68A와 HIL Simulator를 연결하는 부분이다. 연결이 완료되면 좌측 하단의 전원버튼을 눌러서 HIL Simulator의 전원을 켜다.



Fig. 4.23 Wiring of PC and HIL Simulator

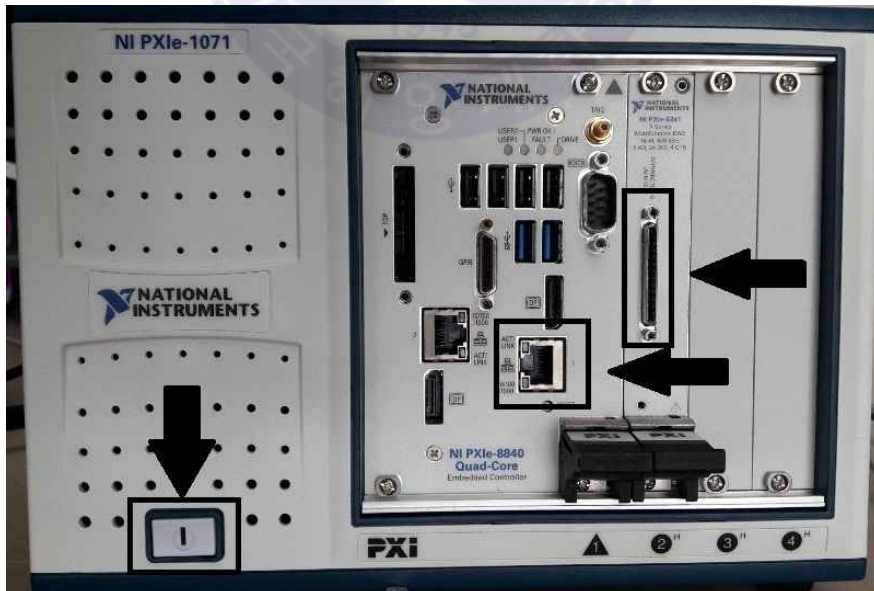


Fig. 4.24 Connection port of HIL Simulator

⑰ 연결과정이 끝나면 PC에서 VeriStand 2015 sp1 프로그램을 실행하여 “New NI VeriStand Project“ 버튼을 누른 후, 새로운 project를 생성하고 저장할 위치를 설정한다. NI Veristand project는 PC와 HIL simulator의 연결에 관한 세팅, 적용 모델에 관련된 정보와 모니터링 정보 등을 포함한다.

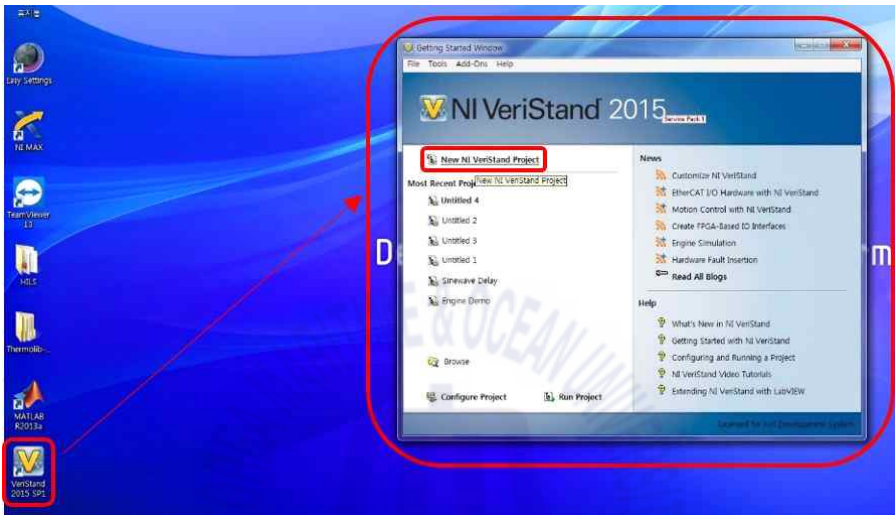


Fig. 4.25 Running Veristand 2015 sp1

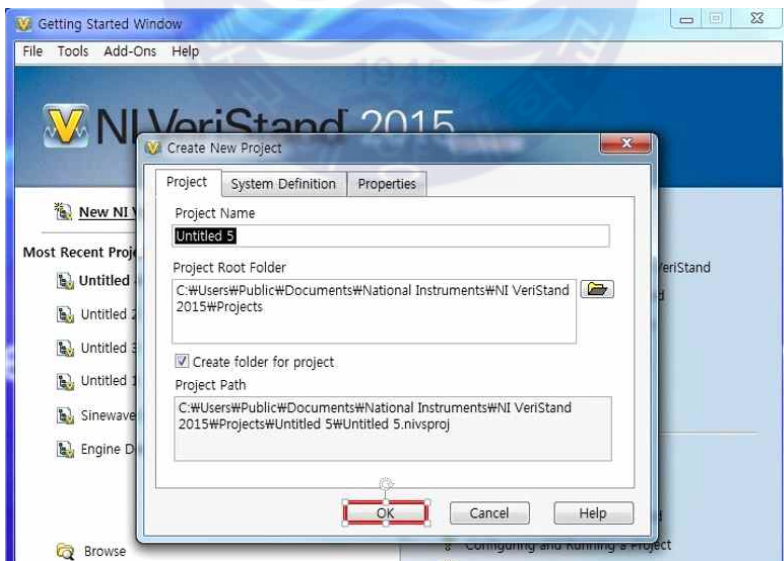


Fig. 4.26 Generating new project of veristand

⑱ project를 생성하면 Fig. 4.27 좌측의 Project Explorer 창이 뜨는 것을 확인할 수 있다. HIL Simulator와의 연결 관련 설정, 모델 선택 등을 여기서 실행할 수 있다. 먼저 HIL Simulator와의 연결 관련 설정을 한다.

Project Explorer의 아래 목록에서 “System Definition File-(project 이름)”을 더블클릭하면 아래 우측과 같은 System Explorer 창이 뜬다.

System Explorer 구성 중 Targets-controller를 선택하여 HIL Simulator인 PXI-Controller에 대한 설정을 한다.

- ㉑ Operating System : Pharlap
 - Veristand는 Pharlap으로 운영이 된다.
- ㉒ IP Address : 1.1.1.1
 - PXI Controller의 주소, target의 주소를 입력한다.
- ㉓ Target Rate : 500 Hz
 - 필요에 따라 Target Rate를 변경할 수 있으며 500Hz로 설정한다.

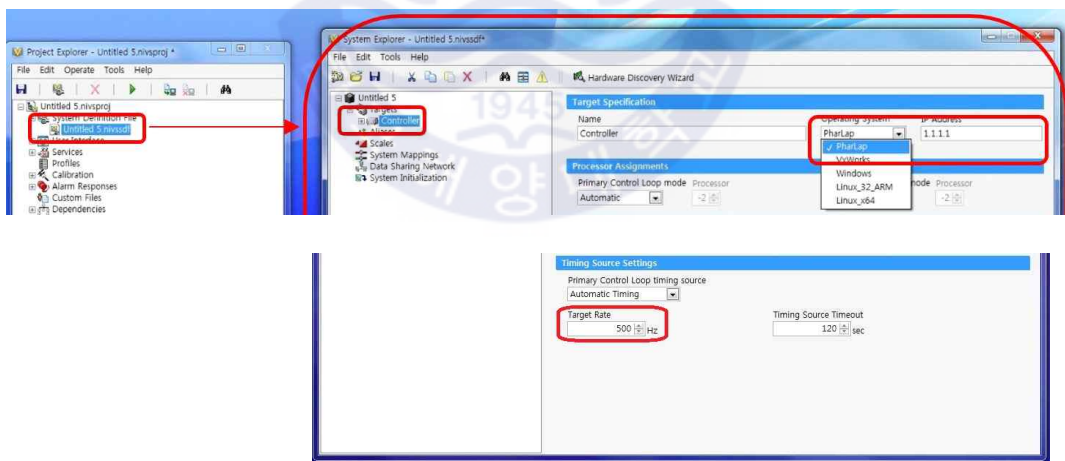


Fig. 4.27 Setting of PXI controller

⑲ 연결 관련 설정 후, System Explorer 창 상단의 Hardware Discovery Wizard 버튼을 눌러서, 현재 연결되어 있는 HIL Simulator를 불러온다. # Devices Found 란이 1인 경우만 연결이 되어있는 장비이다. 아래의 Next 버튼을 눌러 연결된 HIL Simulator 확인을 끝낸다.

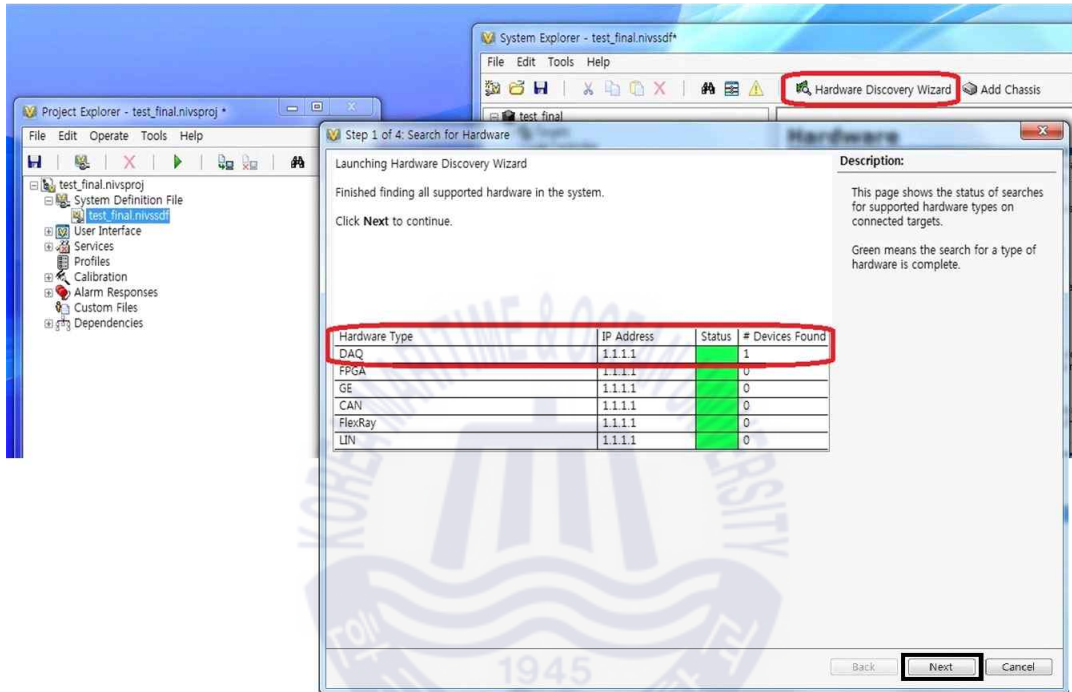


Fig. 4.28 Connecting PXI controller with PC(Veristand)

⑳ HIL Simulator 연결 후, HIL Simulator에서 시뮬레이션 할 모델을 선택해야 한다. System Explorer 구성 중 Simulation Models-Models를 우클릭하여 ‘Add simulation Model’ 을 클릭하면 적용할 .dll 파일을 선택하는 창이 뜬다. 해당 .dll 파일을 찾아서 선택하여 적용한다.

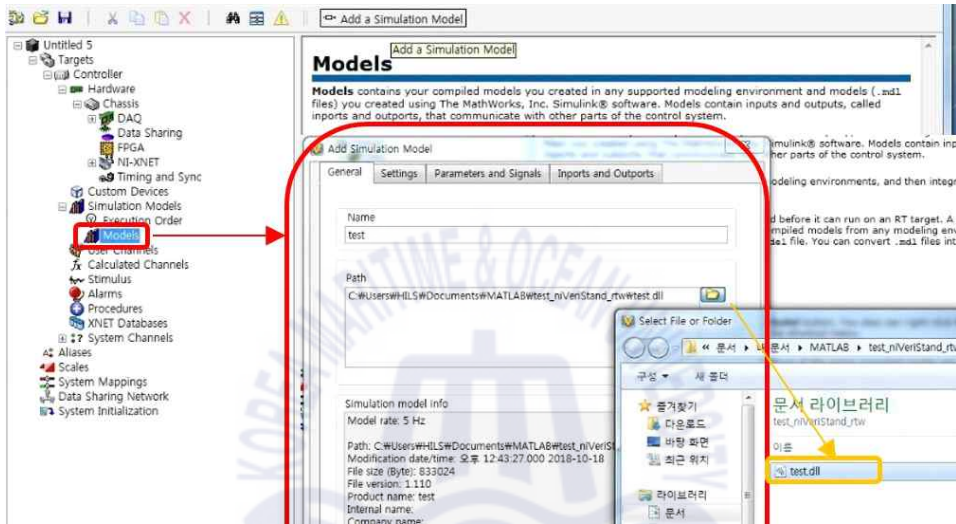


Fig. 4.29 Loading file: .dll at Veristand

㉑ 모델 적용 과정까지 끝이 나면 작업한 내용을 저장한다.

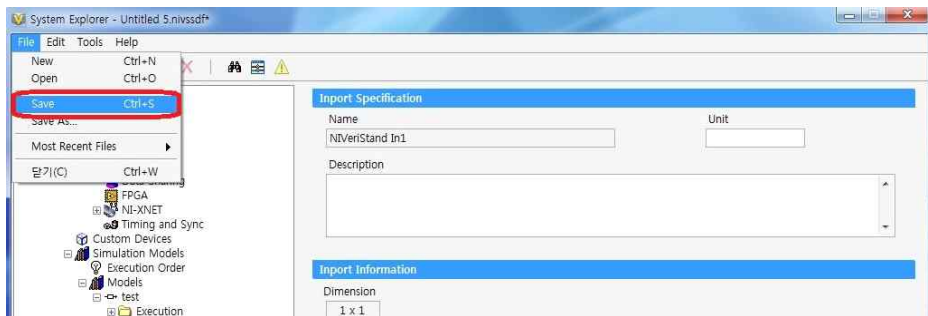


Fig. 4.30 Saving after all process

㉒ Project Explorer의 ▶ 버튼을 누르면 HIL Simulator의 모델이 시뮬레이션을 시작하고 Workspace가 열리게 된다. Workspace는 HIL Simulation을 조정 및 모니터링할 수 있는 작업창이 된다. Workspace의 Screen-Edit mode를 선택하면 격자무늬가 생기며 원하는 양식으로 작업창을 설정할 수 있다.

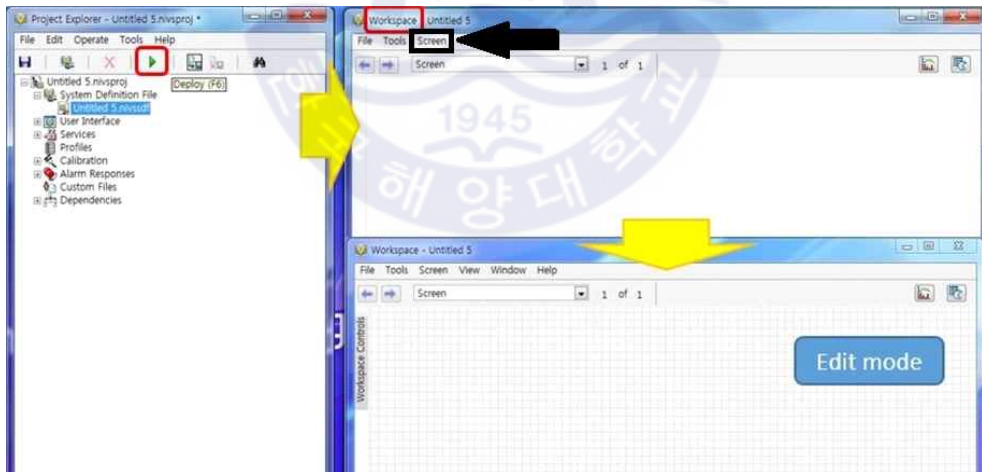


Fig. 4.31 Running Veristand workspace

㉓ Edit mode에서 좌측의 Workspace Controls 버튼을 눌러 원하는 인터페이스를 구성한다. 아래 그림의 경우, Workspace 작업창에 dial을 추가하는 과정이다. 먼저 Numeric Control-dial 항목을 드래그하여 작업창으로 옮겨놓는다.

정상적으로 작업창에 새 항목이 추가되면 Fig. 4.32의 우측 상단의 Item Properties 창이 뜬다. 표시된 아이콘을 클릭하면 dial과 모델의 연결을 설정한다. Fig. 4.32 우측 하단의 Browse 창이 뜨면 Targets-Controller-Simulation Models-Models-(파일 이름)-Imports의 목록에서 모델에 적용했던 NIVeriStand In 블록을 확인할 수 있다. 여기서 연결하고자 하는 블록을 선택한 후 하단의 OK 버튼을 누른다. 이렇게 연결하였을 경우 dial의 값이 HIL Simulator에서 구동되는 모델의 NIVeriStand In1 포트에 입력된다.

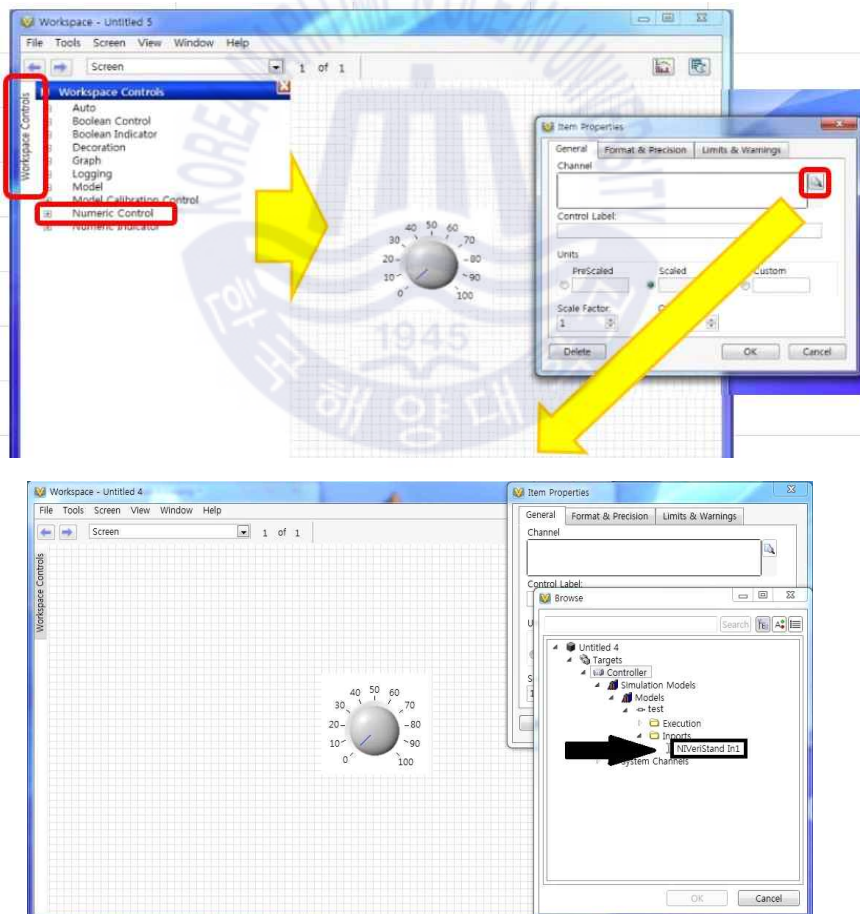


Fig. 4.32 Example of adding dial into workspace

㉔ dial의 눈금 범위를 조정하려면 ㉑번 과정 후 Item Properties 창에서 ‘Format & Precision’ 카테고리를 선택하여 Scale Max, Scale Min을 수정한다. 수정이 완료되면 dial scale이 설정한 값으로 바뀌게 된다.

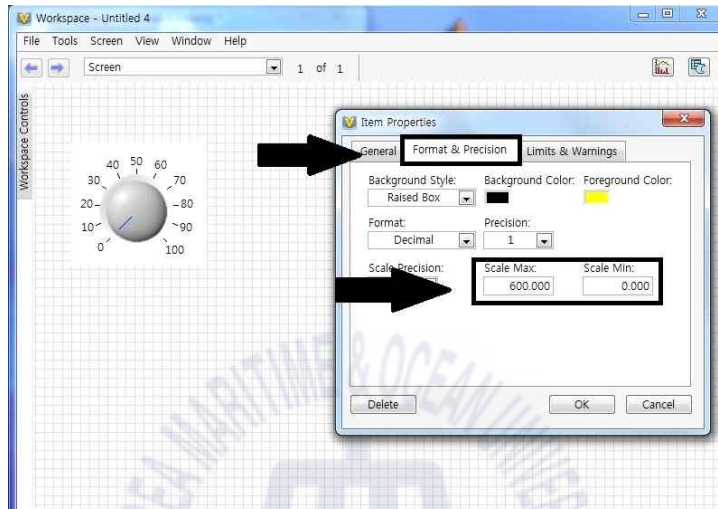


Fig. 4.33 Reguating scale of dial

㉔ 다음은 HIL Simulator의 출력값을 표시하는 그래프를 Workspace 작업창에 추가하는 과정이다. dial을 추가하는 과정과 동일하게 Workspace Controls-Graph에서 Simple을 드래그하여 작업창에 놓는다. 정상적으로 graph가 놓여지면, 아래와 같은 Graph Channel Selection 창이 뜬다. Targets-Controller-Simulation Models-Models-(파일 이름)-Outports의 목록에서 모델에 적용했던 NIVeriStand Out 블록을 확인할 수 있으며 원하는 블록을 선택한 후 화살표를 클릭하여 오른쪽 창에 추가한다. 추가가 완료되면 OK 버튼을 눌러서 graph 추가 작업을 종료한다. 이렇게 연결하면 HIL Simulator에서 구동되는 모델의 NIVeriStand Out1 블록의 값이 graph에 표기된다.

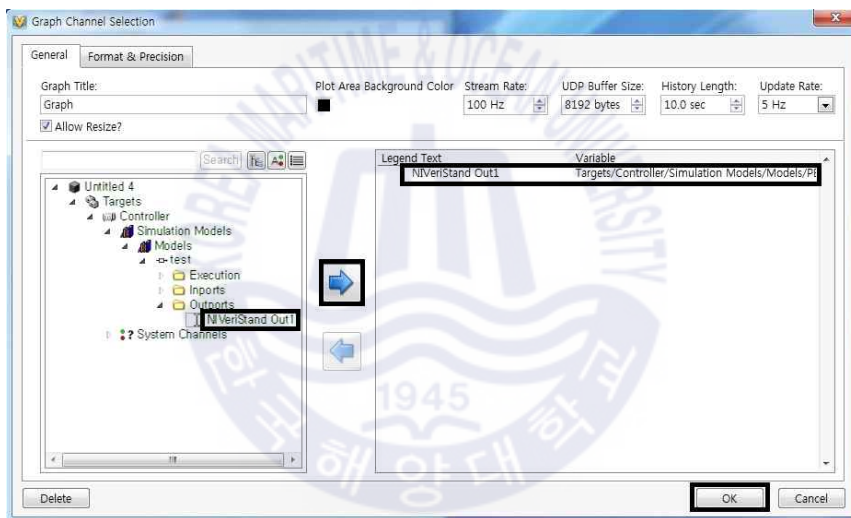


Fig. 4.34 Example of adding graph into workspace

㉔ 작업창을 조정하는 과정이 끝나면 Workspace의 Screen-Edit mode를 클릭하여 해제한다. 아래 그림은 Editing을 끝낸 후 운전 중인 HIL Simulator에 따른 Veristand의 모습이다. 좌측의 Ampere(load) In(부하 입력값) dial을 증가시켰을 때 그에 따라 증가하는 출력값을 볼 수 있다. 이는 HIL Simulator에서 운전되는 실시간 시뮬레이션 결과값이다.



Fig. 4.35 Running result of veristand

※ 다음은 커넥터 블록 SCB-68A가 HIL Simulator와 연결된 상태일 때, 커넥터 블록의 channel 설정 과정이며, 모델과 실제 하드웨어를 연결하는 과정이 된다. 모델 설정이 끝난 ⑰번 과정 이후에 아래의 절차를 따르면 된다.

❶ 커넥터 블록 SCB-68A의 channel 설정 과정이다. System Explorer 목록에서 Targets-Controller-Hardware-Chassis-DAQ-PXIISlot2 중 PXIISlot2를 우클릭하여 ‘Add Channels’ 선택한다.

Add DAQ Channels 창이 뜨면 추가할 channel type, measurement type 등을 지정해야 한다. channel type은 사용하고자 하는 channel의 유형을 의미하며, Analog Input(AI), Analog Output(AO), DI(Digital Input), DO(Digital Output) 등이 있다. measurement type은 해당 channel로 주고받는 신호의 측정 유형이 된다.

예를 들어 하드웨어의 전기 신호를 HIL Simluator 모델에 입력하려면 AI, Voltage를 선택한다. 모델의 출력 전압을 하드웨어로 송출하려면 AO, Voltage를 선택한다. 아래의 Channel Properties는 해당 channel의 범위를 지정할 수 있다.

설정이 끝나면 Next 버튼을 누른다. Fig. 4.36은 커넥터 블록의 channel에서 받는 아날로그 신호가 전기 신호이며 -5~5V 사이의 값임을 설정하는 과정이다. Next 버튼을 누르면 Fig. 4.37과 같은 창이 뜨며, 현재 연결되어 있는 커넥터 블록에서 사용가능한 channel이 표시된다. SCB-68A의 경우 Analog Input channel이 16개가 있다. 이 중 사용을 원하는 channel의 체크박스를 클릭한 후 finish 버튼을 누른다.

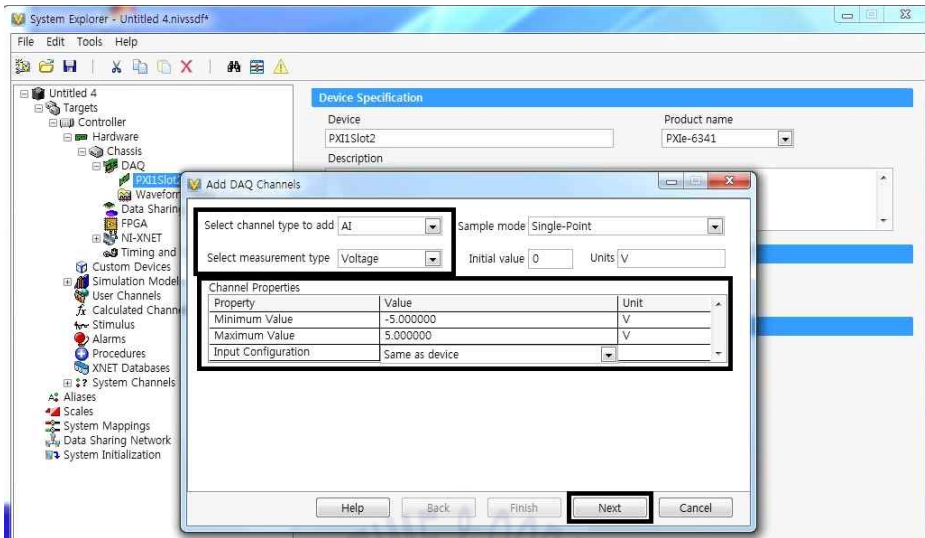


Fig. 4.36 Adding channels to Veristand

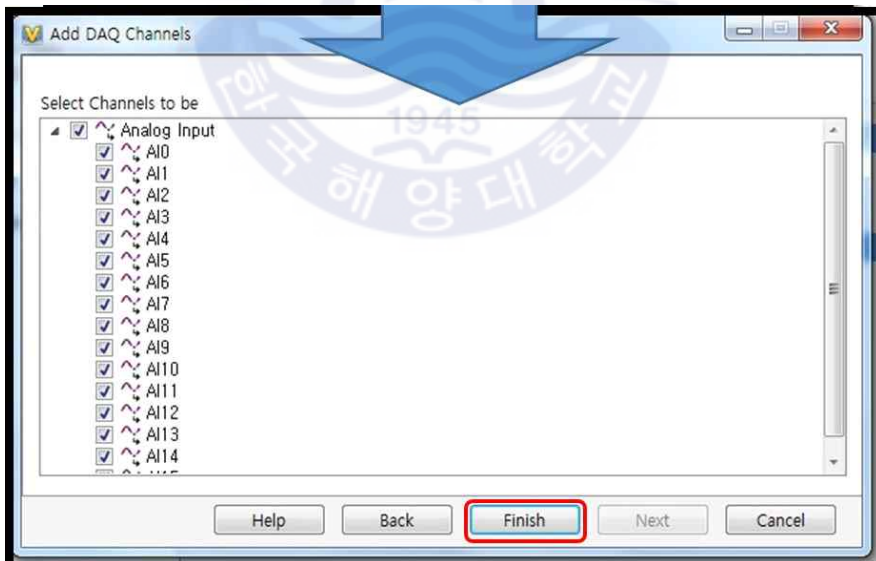


Fig. 4.37 Setting of Analog Input channels

② Analog Input에 대한 설정과 동일하게 Analog Output channel을 설정한다. Analog Output, Voltage로 지정 후 범위는 -10~10V로 설정한다. Next 버튼을 누르면 Fig. 4.39의 창이 뜨며 커넥터 블록에서 사용할 수 있는 Analog Output channel이 2개가 있는 것을 확인할 수 있다. 사용을 원하는 channel의 체크박스를 클릭한 후 finish 버튼을 누르며 channel 설정을 종료한다.

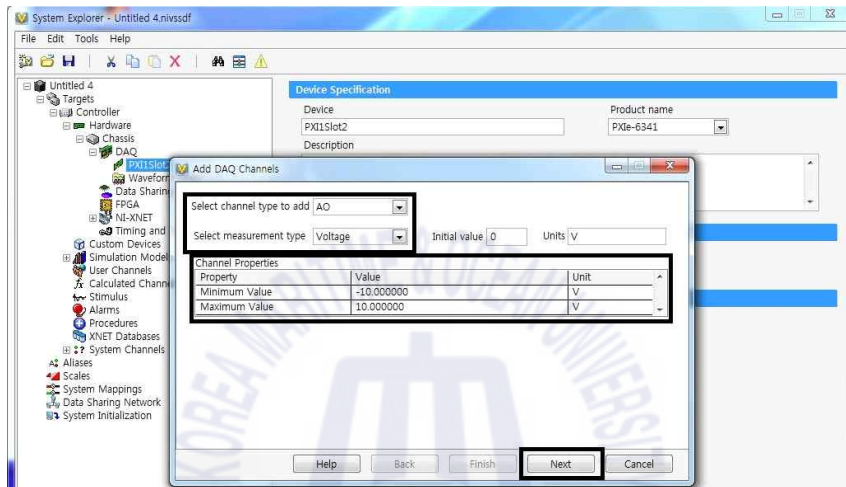


Fig. 4.38 Setting of Analog Output channels

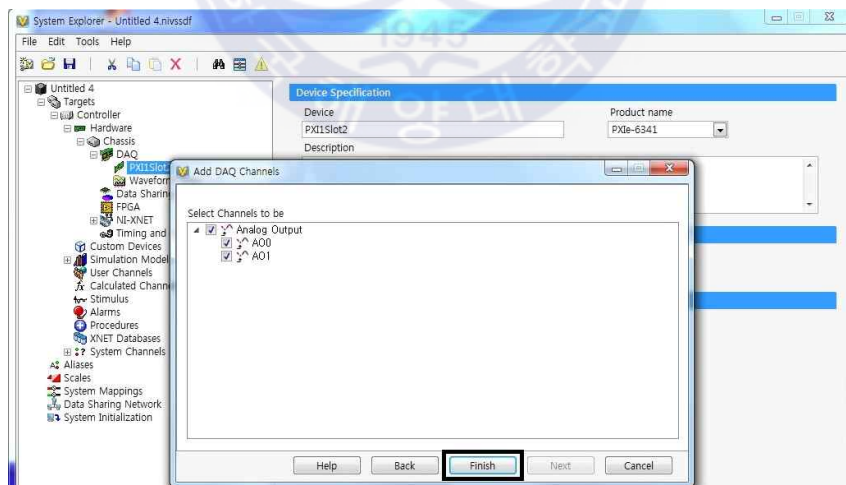


Fig. 4.39 Selection of Analog Output channels

③ 위의 설정한 channel과 model을 연결하는 과정을 Mapping이라고 한다. 아래는 HIL Simluator의 시뮬레이션 출력값을 Analog Output channel로 송출하기 위한 Mapping 과정이다.

System Explorer의 목록에서 PXIISlot2를 선택한 후 상단의 Configure Mappings 버튼을 클릭하면 Fig. 4.40의 System Configuration Mappings 창이 뜨는 것을 확인할 수 있다. 여기서 좌측의 Sources는 전달하고자 하는 data가 출력되는 NIVeriStand Out1 블록을 선택한다. 우측의 Destinations는 Sources에서 받은 data를 내보낼 channel인 AO0을 선택한다. 선택이 완료된 후 우측 하단의 Connect 버튼을 누르면 아래쪽 Mappings 창에 mapping이 완료된 항목이 표시된다. mapping 과정을 완료하면 연결이 완료된다. OK 버튼을 누른 후 ⑱번 과정으로 돌아가면 된다.

㉓ 아날로그 신호를 Model에 입력하는 mapping 과정

Sources의 Hardware-Chassis-DAQ-PXIISlot2-Analog Input-AI**중 선택

Destinations의 Simulation Models-Models-(파일이름)-Inport-NIVeriStand In*
중 선택

㉔ Model의 출력값을 아날로그 신호로 송출하는 mapping 과정

Sources의 Simulation Models-Models-(파일이름)-Outports-NIVeriStand Out*
중 선택

Destinations의 Hardware-Chassis-DAQ-PXIISlot2-Analog Output-AO**중 선택

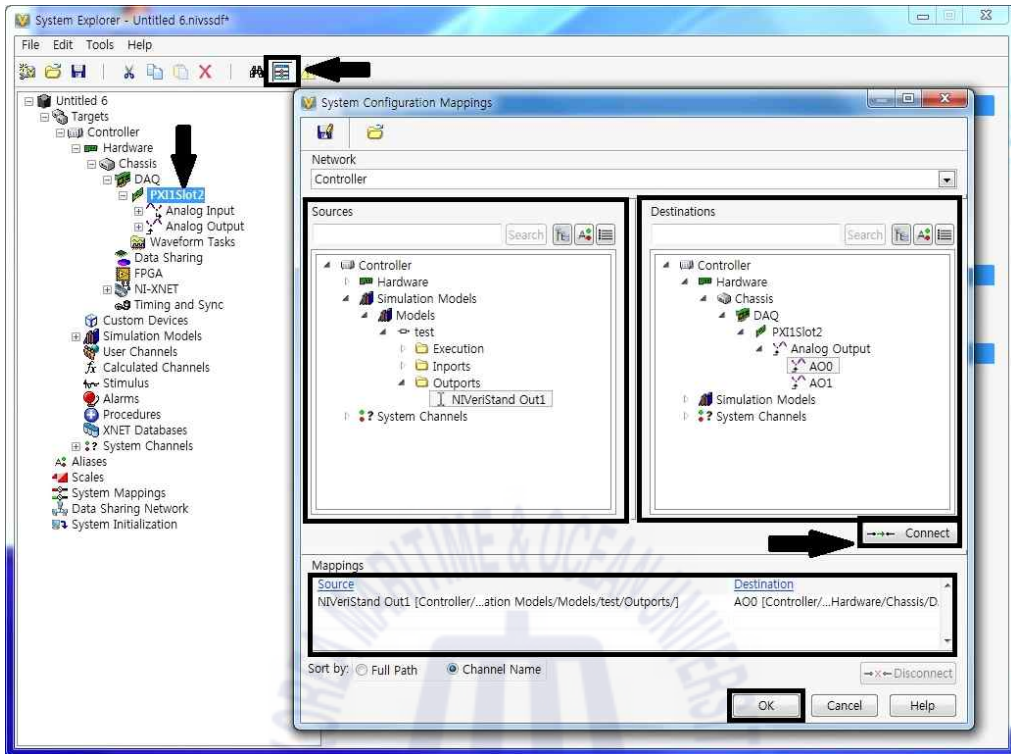


Fig. 4.40 Process of mapping

제 5 장 연구결과 고찰 및 검토

5.1 연료전지 모델 검증

연료전지 모델 검증은 개발한 모델을 아래 Table. 5.1의 조건으로 시뮬레이션 한 결과와 실험 결과의 비교를 통해 진행하였다. Fig. 5.1은 실험 결과와 모델을 산소 및 공기로 운전하였을 때의 출력 전압 값이다. 실험 결과와 산소를 이용한 모델 운전 결과를 비교하였을 때, 부하가 112A 인 50~400s의 운전 영역에서는 약 1.9V의 차이로 모델보다 실험 결과가 더 크며, 1600s의 운전 영역까지 구간에 따라 3.0~4.8V의 차이가 있으나 정격부하인 530A 운전 영역에서는 실험 결과와 모델 운전 결과의 차이가 1.1V정도로 거의 동일한 전압 값을 나타내었다. 공기를 이용한 모델 운전 결과의 경우 실험 결과와는 부하에 따라 11~17V의 차이가 확인되었다. Fig. 5.2는 실험 결과와 모델의 출력을 비교하였다. 실험 값과 산소를 사용한 모델의 결과가 거의 동일하며 부하에 따라 0.4~1.5kW의 차이를 보이며 실험값이 더 높게 나타났다. 공기를 사용한 모델의 경우 전체 부하에서 산소를 사용한 모델의 결과와 0.1~6kW의 차이를 보인다.

Table 5.1 Conditions of Simulink model simulation

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
Pressure	Cathode Inlet [P_a]	253312
	Anode Inlet [P_a]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

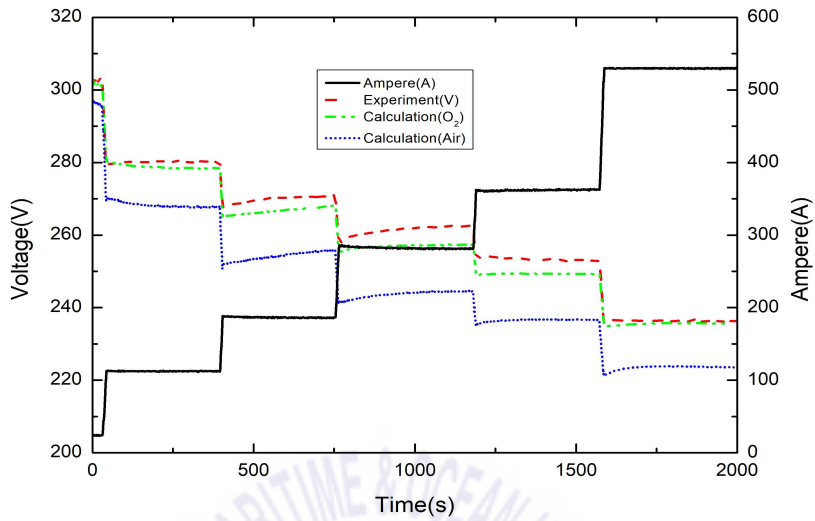


Fig. 5.1 Comparison between the simulated and the measured voltage

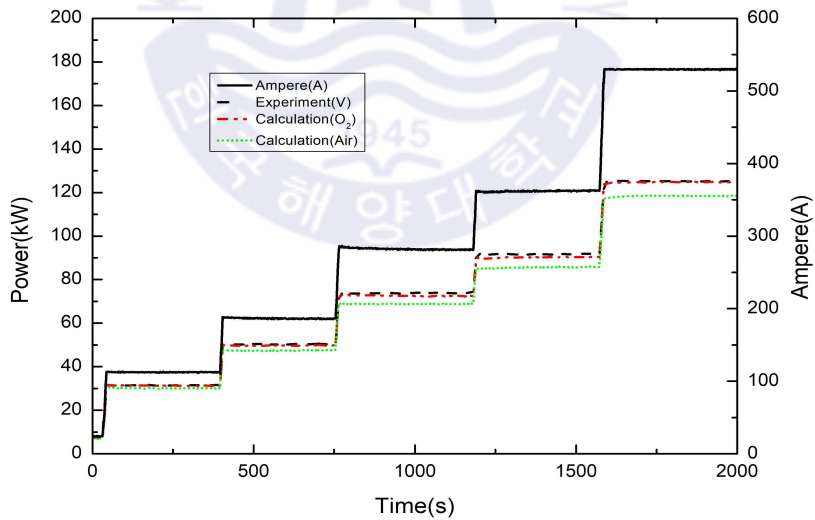


Fig. 5.2 Comparison between the simulated and the measured power

Fig. 5.3은 전류밀도에 따른 단 셀 전압을 나타내었다. 단 셀 전압의 경우 전류밀도 값이 증가할수록 감소하며, 실험 결과와 산소를 사용한 모델의 운전 결과는 거의 동일한 값을 갖지만 $0.18\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 0.014V 로 최대 차이를 나타낸다. 공기를 사용한 모델의 경우 산소 운전의 경우보다 $0.016\sim 0.052\text{V}$ 낮은 단 셀 전압을 나타냈다.

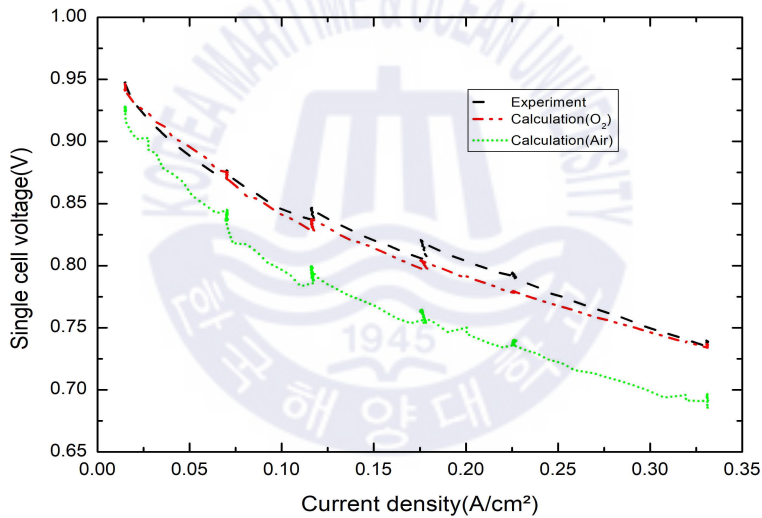


Fig. 5.3 Comparison between the simulated and the measured I-V curve

5.2 연료전지 모델의 조건별 운전 결과

5.2.1 온도에 따른 영향

스택의 운전온도에 따른 영향을 확인하고자 아래의 **Table. 5.2**와 같은 운전조건에서 산소와 공기를 사용하였을 때 3가지 작동 온도(333, 353, 363K)에 대하여 각각 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 5.4는 스택의 운전온도 변화에 따른 출력 전압을 나타내었다. 산소의 경우 80℃를 기준으로, 60℃와 90℃ 운전 시 각각 0~3.18V와 0~1.61V의 전압 차이가 있었으며 공기의 경우 각각 0~5.35V와 0~5.36V의 차이로 산소의 경우보다 온도에 의존도가 더 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 5.5는 스택의 운전온도 변화에 따른 출력을 나타낸다. 스택 출력의 경우 산소 운전 시 그 차이가 60~80℃에서 0~1.07kW, 80~90℃에서 0~1.00kW의 차이를 보였으며 공기 운전 시 동일 온도 조건에서 0~2.83kW, 0~2.44kW의 차이를 보였다. 90℃로 운전한 경우 60℃로 저온 운전한 경우보다 산소와 공기 운전 시 각각 2kW, 5kW만큼 출력이 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 5.2 Simulated conditions according to temperature

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	333, 353, 363
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
	Thickness of membrane [cm]	0.03
Pressure	Cathode Inlet [Pa]	253312
	Anode Inlet [Pa]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

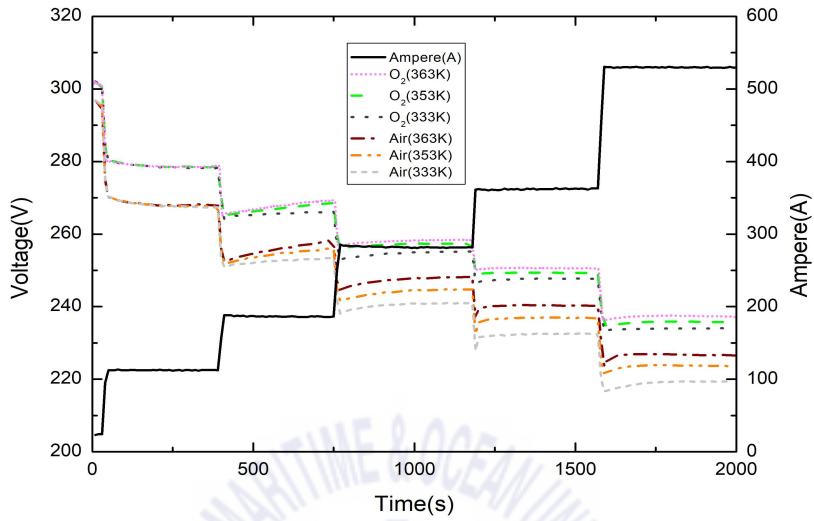


Fig. 5.4 Comparison of model voltage according to various running temperature

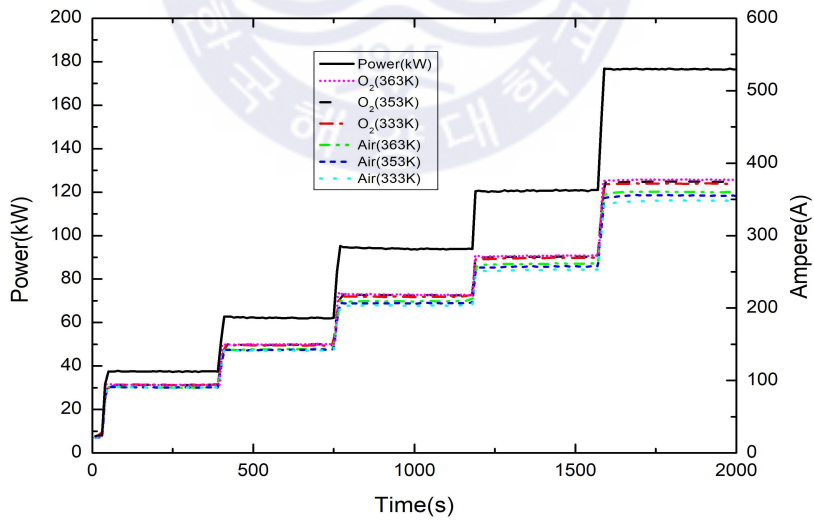


Fig. 5.5 Comparison of model power according to various running temperature

Fig. 5.6은 스택의 운전온도 변화에 따른 Overvoltage를 비교하였다. 스택의 출력 전압이 Fig. 5.4 과 같이 차이가 발생하는 이유는 Fig. 5.6을 통해서 설명이 가능하다. 단 셀에서 생성되는 개회로 전압은 작동 온도 60℃일 때 산소를 사용했을 경우가 가장 높게 확인이 된다. 그러나 활성화손실 전압이 크기 때문에 단 셀 전압이 낮게 생성되며, 활성화손실 전압이 가장 작은 작동 온도 90℃일 때 산소를 사용한 경우가 단 셀 전압이 가장 큰 것으로 확인된다. 개회로 전압의 경우 온도가 낮은 경우 더 높게 나타나는 것이 확인되었다. 이는 식(5)에서 확인할 수 있다. 활성화손실 전압의 경우 식(6)에서 온도와 각 물질의 포화압력에 의한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 온도 변화에 따른 그래프의 경우 옴 전압손실과 농도 전압손실의 경우 차이가 없이 동일하였다. 따라서 단 셀 전압은 (개회로 전압) - (활성화손실 전압)으로 그 크기를 비교할 수 있는데 결과적으로 Fig. 5.4의 전압 그래프와 같은 양상을 띄는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.7의 전류밀도 - 단 셀 전압 그래프와 Fig. 5.8의 전류밀도 - 스택 효율 그래프의 경우 유사한 경향과 나타내며 전류밀도가 증가할수록 수치가 감소하는 방향으로 진행한다. 전류밀도가 커질수록 수치가 감소하는 까닭은 부하 증가에 따라 옴 저항손실이 크게 증가하기 때문이며 각각 물질별로 전류밀도 증가에 따라 차이가 더 커지는 것은 개회로 전압의 증가 폭보다 활성화손실 전압의 증가 폭이 더 크기 때문이다.

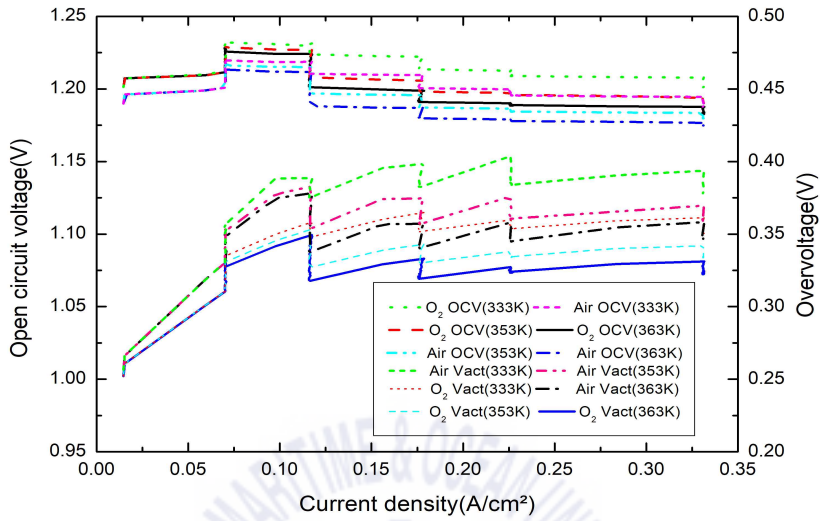


Fig. 5.6 Comparison of model overvoltage according to various running temperature

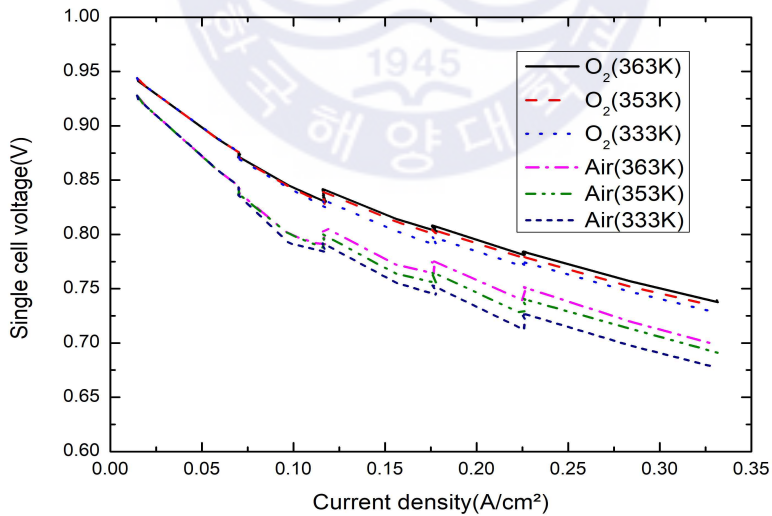


Fig. 5.7 Comparison of model I-V curve according to various running temperature

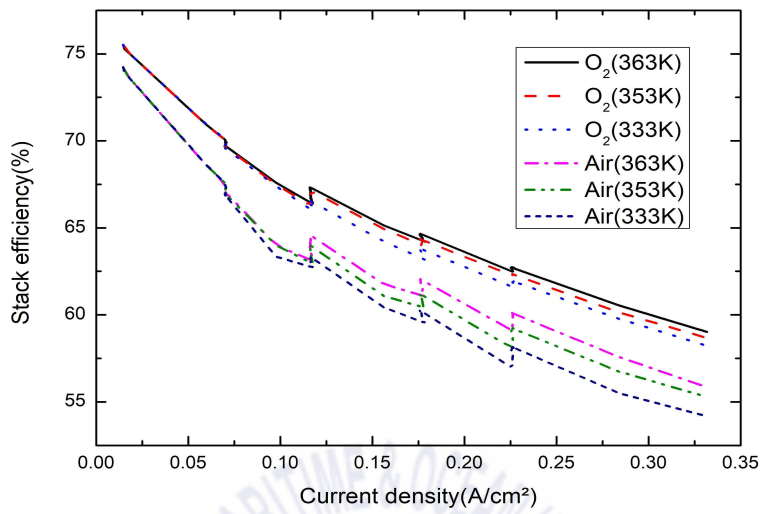
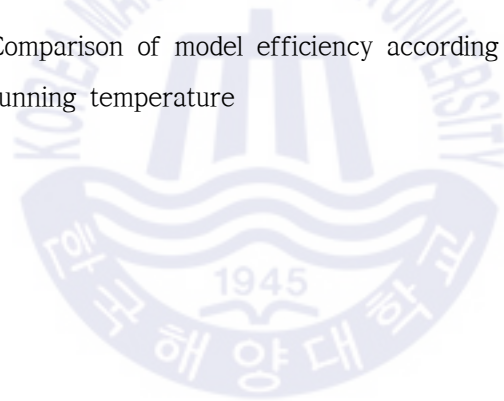


Fig. 5.8 Comparison of model efficiency according to various running temperature



5.2.2 압력에 따른 영향

연료/가스 공급압력에 따른 영향을 확인하고자 아래의 Table 5.3의 조건으로, Cathode 및 Anode 공급압력을 151987, 253312, 354637 Pa로 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 5.9는 연료/가스 공급 압력 변화에 따른 출력 전압 값이다. 산소의 경우 압력에 따른 출력 전압의 차이가 적으며, 압력에 따라 0.2~1.4V의 차이만 나타났으나 공기의 경우 압력의 차이에 따라 초기 저부하 운전 영역을 벗어나 부하가 증가할수록 1.5 및 2.5bar의 차이는 11.47~19.59V, 2.5 및 3.5bar의 차이는 5.97~9.83V로 압력의 영향 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.10는 연료/가스 공급 압력 변화에 따른 출력 값을 나타낸다. 산소의 경우 3가지 압력조건의 출력 결과의 차이는 1kW 내외이며, 공기의 압력별 출력 결과는 정격부하에서 151987 Pa 및 354637 Pa 사이, 최대 18kW의 차이를 확인할 수 있다.

Table 5.3 Simulated conditions according to pressure

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
	Thickness of membrane [cm]	0.03
Pressure	Cathode Inlet [Pa]	151987, 253312,
	Anode Inlet [Pa]	354637
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

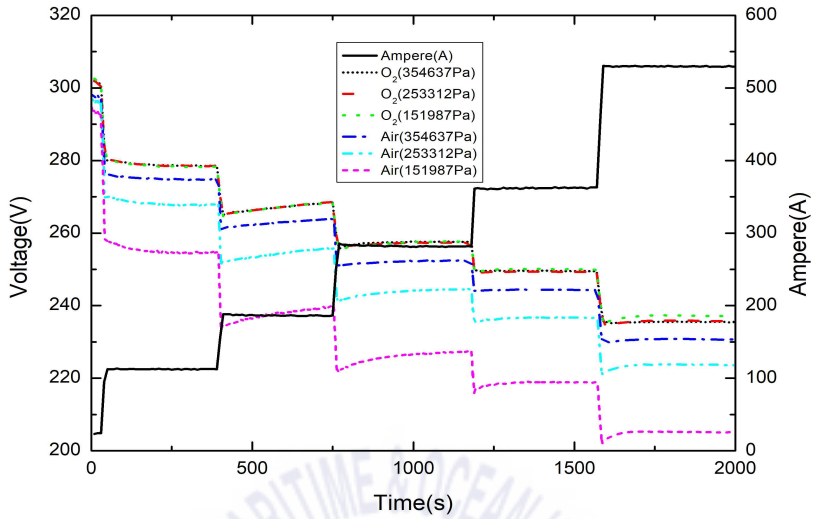


Fig. 5.9 Comparison of model voltage according to various fuel/gas supply pressure

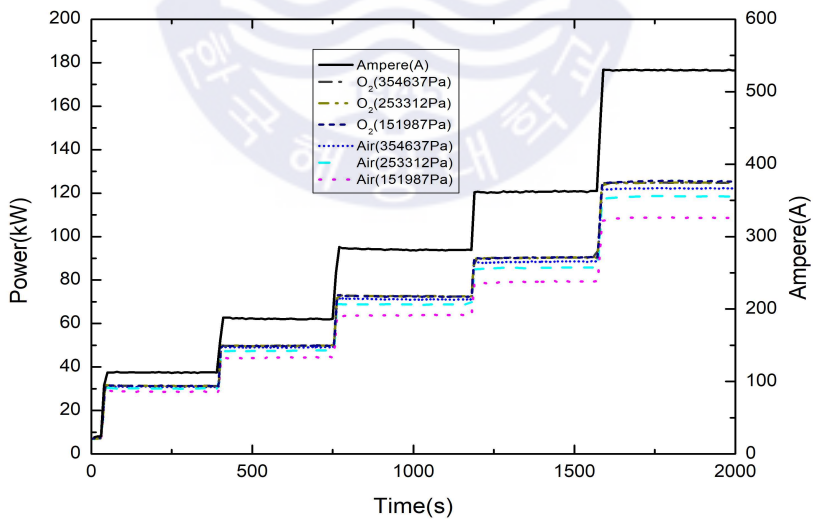


Fig. 5.10 Comparison of model power according to various fuel/gas supply pressure

Fig. 5.11은 연료/가스 공급 압력 변화에 따른 Overvoltage를 나타내고 있다. 연료/산소 공급 압력이 클수록 개회로전압이 높은 것을 확인할 수 있다. 활성화 손실전압은 산소의 경우 식(5)에 의해 압력이 클수록 증가하여 3.5bar인 경우 가장 크게 나타났으나, 공기의 경우는 반대로 압력이 낮을수록 활성화 손실전압이 증가하였다. 이는 공기를 사용하였을 때 압력의 감소가 촉매 부근의 영역에서 반응할 수 있는 물질의 수를 감소시켜 활성화 손실전압이 증가하기 때문이다. 또한 음 전압손실과 농도 전압손실의 경우 차이가 없이 동일하였다.

Fig. 5.12의 단 셀 전압 그래프와 Fig. 5.13의 스택 효율 그래프는 동일한 경향을 나타내었다. 산소의 경우 압력에 따른 전압 및 효율 차이가 거의 없었으며, 공기의 경우 압력이 낮아질수록 그 감소폭이 더 컸다.



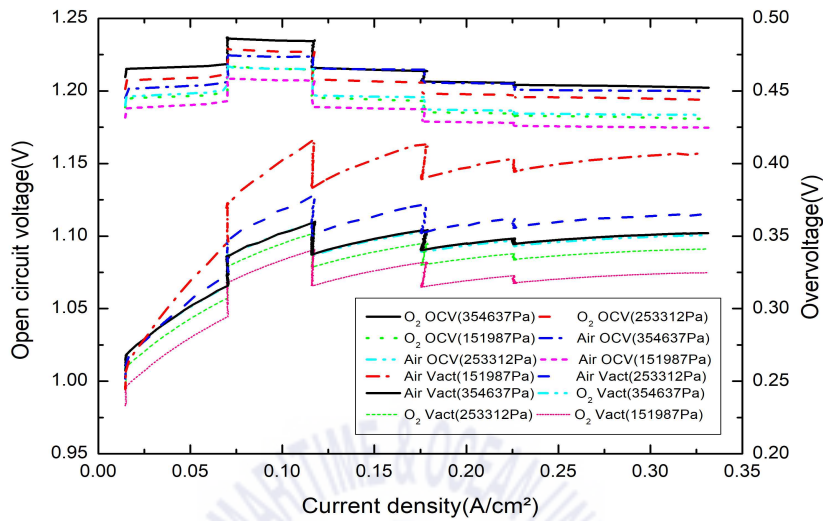


Fig. 5.11 Comparison of model overvoltage according to various fuel/gas supply pressure

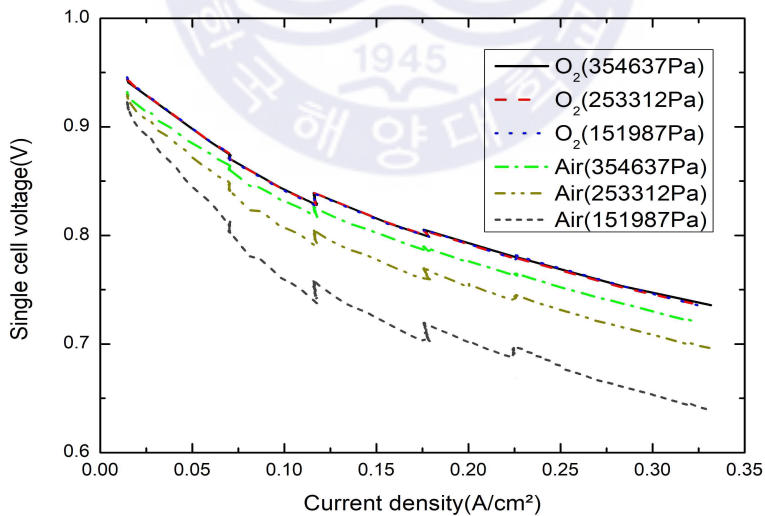


Fig. 5.12 Comparison of model I-V curve according to various fuel/gas supply pressure

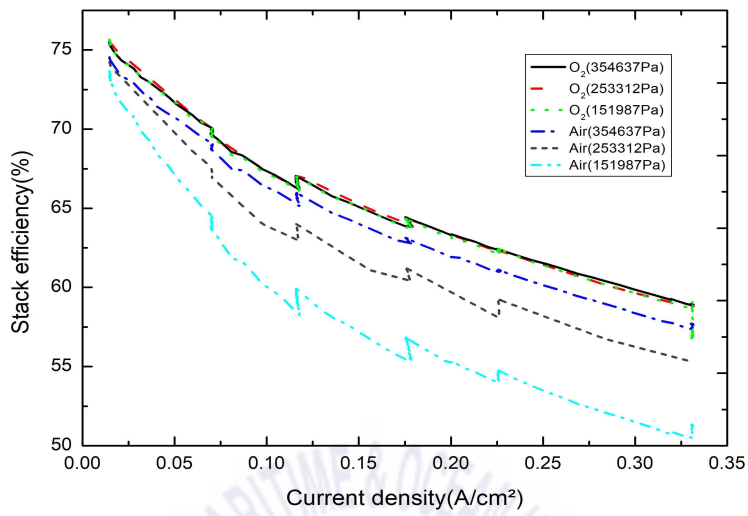
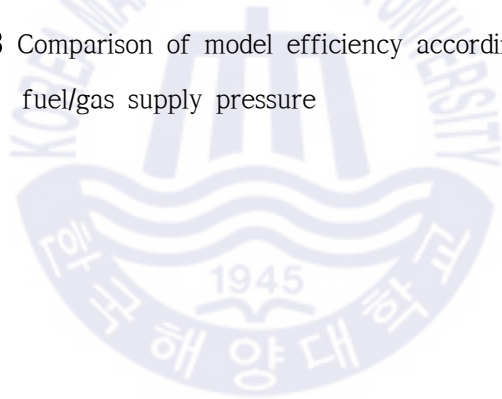


Fig. 5.13 Comparison of model efficiency according to various fuel/gas supply pressure



5.2.3 반응면적에 따른 영향

반응면적 변화에 따른 영향을 확인하기 위해 Cathode 측 공급 기체가 산소 또는 공기인 경우 각 반응면적이 0.16m²을 기준으로 각 모서리 당 0.1m가 증감한 경우를 시뮬레이션 하였으며 그 조건은 **Table 5.4**에 나타내었다.

Fig. 5.14는 반응면적 변화에 따른 출력 전압을 나타낸다. 반응면적을 늘렸을 경우 증가한 면적은 56.75%였으며, 산소의 경우 출력 전압 차이는 구간에 따라 2.37~16.83V만큼 발생했으며, 공기의 경우 2.85~17.90V로 부하가 증가할수록 더 큰 차이가 나타났다. 반응면적을 줄였을 경우 감소한 면적은 43.75%였으며, 산소의 경우 출력 전압의 차이는 구간에 따라 4.82~30.87V, 공기의 경우 5.77~32.68V로 증가의 경우와 동일하게 부하가 증가할수록 출력 전압의 감소폭이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5.15는 반응면적 변화에 따른 출력을 나타낸다. 출력의 경우 산소를 이용했을 때 전 부하 운전 시 0.09m²와 0.16m²는 최대 16.38kW, 0.16m²와 0.25m²는 최대 8.93kW의 차이를 나타내었으며 공기를 이용했을 때 전 부하 운전 시 0.09m²와 0.16m²는 최대 17.33kW, 0.16m²와 0.25m²는 최대 9.49kW의 차이를 보였다.

Table 5.4 Simulated conditions according to active area

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m ²]	0.09, 0.16, 0.25
	Thickness of membrane [cm]	0.03
Pressure	Cathode Inlet [Pa]	253312
	Anode Inlet [Pa]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

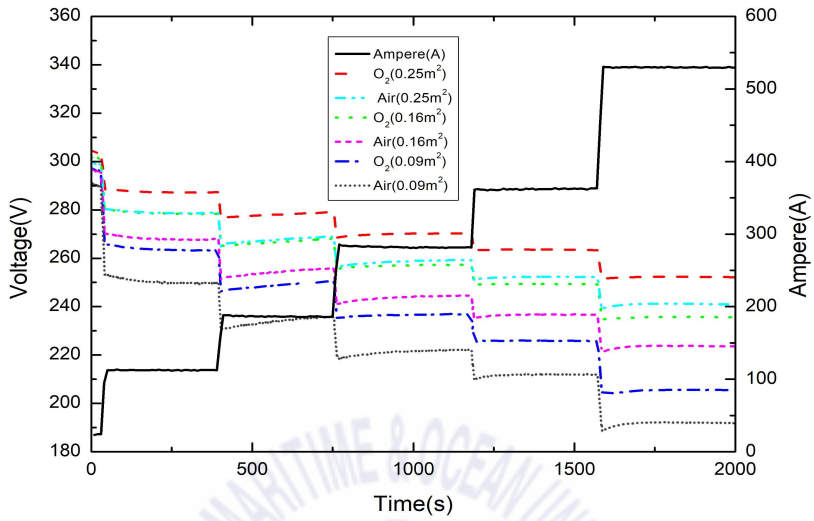


Fig. 5.14 Comparison of model voltage according to various active area

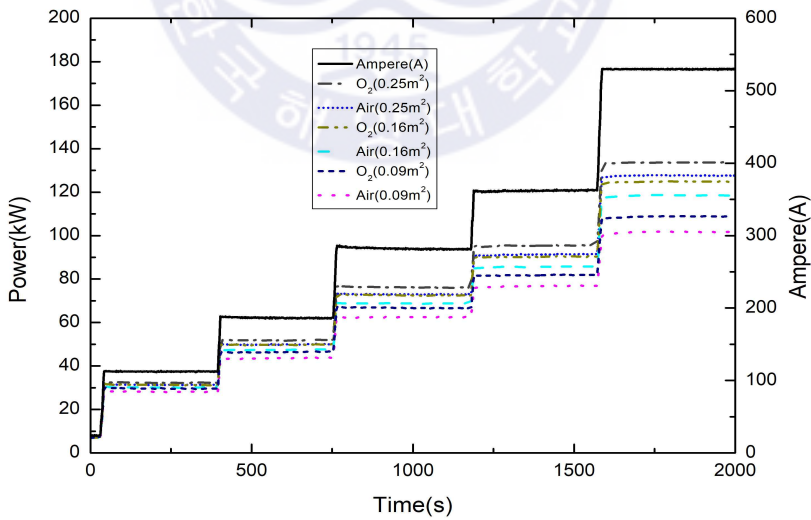


Fig. 5.15 Comparison of model power according to various active area

Fig. 5.16은 반응면적 변화에 따른 손실전압 그래프이며 음 손실저항의 차이가 확연하게 드러난 것을 알 수 있다. 먼저 개회로전압의 경우 산소와 공기의 따른 차이만 보일 뿐 면적 변화에 따라 개회로 전압의 차이는 없다. 활성화손실 전압의 경우 부하가 낮은 구간에서는 반응면적이 작은 경우 차이가 나타나지만, 부하가 높은 구간은 차이가 줄어들게 된다. 면적의 차이에 따라 가장 큰 변화를 보이는 것은 음 손실전압으로, 산소와 공기의 경우 음 손실전압이 동일하게 나타났기에 산소에 대한 결과만을 명시하였다. 면적이 가장 작은 0.09m^2 의 경우 면적이 0.16m^2 보다 거의 2배에 가까운 손실 전압이 생성되었다. 이는 면적이 작아질 경우 전류밀도의 증가하기 때문이다. 농도 손실 전압의 경우 산소와 공기 운전 시 거의 동일한 값을 나타내었다.

Fig. 5.17의 단 셀 전압 그래프와 **Fig. 5.18**의 스택 효율 그래프는 동일한 경향을 보이고 있으며, 산소를 사용했을 때 전 부하 운전 시 0.09m^2 와 0.16m^2 는 0.1V , 0.16m^2 와 0.25m^2 는 0.05V 만큼의 차이를 보였으며 공기를 사용했을 때 전 부하 운전 시 0.09m^2 와 0.16m^2 는 0.11V , 0.16m^2 와 0.25m^2 는 0.06V 만큼의 차이를 나타내었다.

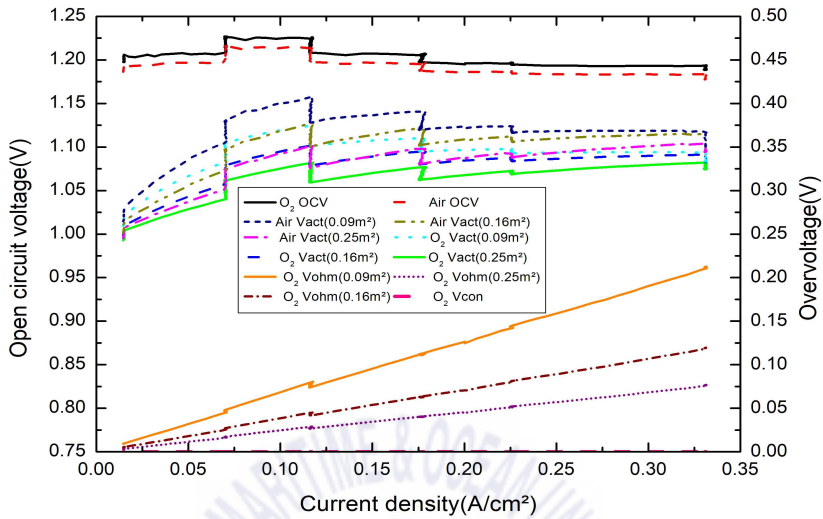


Fig. 5.16 Comparison of model overvoltage according to various active area

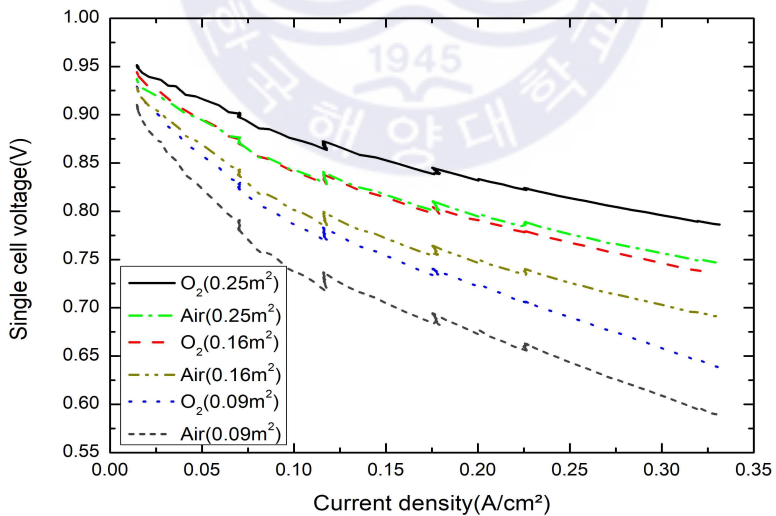


Fig. 5.17 Comparison of model I-V curve according to various active area

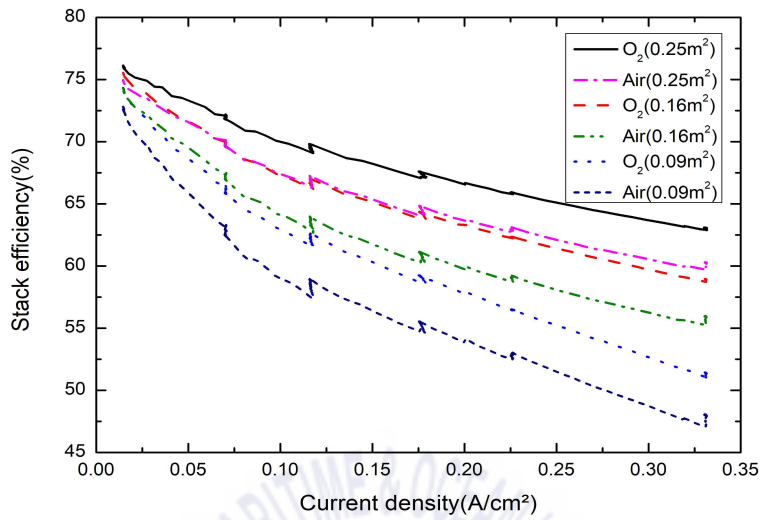
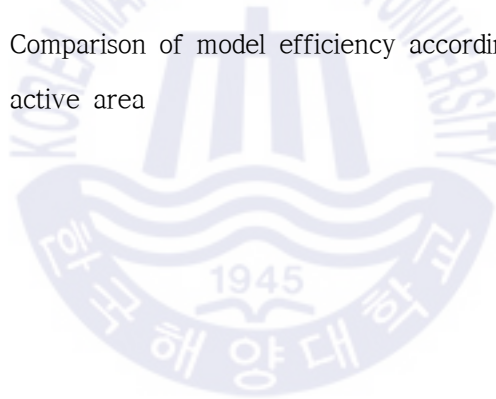


Fig. 5.18 Comparison of model efficiency according to various active area



5.2.4 전해질막 두께에 따른 영향

전해질막 두께의 경우, 얇아질수록 저항이 줄어들어 출력 전압이 커질 수 있으나 적층 및 내구성의 문제로 줄일 수 있는 한계가 있다. 현재의 상용화된 기술의 범위에서 사용 가능한 두께의 한계에 가까운 0.005cm까지를 시뮬레이션의 조건으로 하여 결과를 도출하였다.

Fig. 5.19는 전해질막 두께 변화에 따른 출력 전압을 나타낸다. 전해질막 두께는 0.03cm, 0.01cm, 0.005cm의 세 가지 경우로 하여 **Table 5.5**의 조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 정격부하인 530A에서 산소의 경우 0.03~0.01cm는 25.57V, 0.01~0.005cm는 6.39V의 차이를 나타내며 두께가 얇을수록 출력 전압이 높은 것을 확인하였다. 공기의 경우 정격부하에서 0.03~0.01cm는 25.66V, 0.01~0.005cm는 6.45V의 전압 차이를 보인다.

Fig. 5.20는 전해질막 두께 변화에 따른 출력을 비교하였다. 산소의 경우 정격부하에서 0.03~0.01cm는 13.54kW, 0.01~0.005cm는 0.01V~3.39kW로 출력 차이가 나타났으며, 공기의 경우는 각각 13.62kW, 3.42kW의 출력 차이가 났다.

Table 5.5 Simulated conditions according to thickness of membrane

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
	Thickness of membrane [cm]	0.03, 0.01, 0.005
Pressure	Cathode Inlet [P_a]	253312
	Anode Inlet [P_a]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

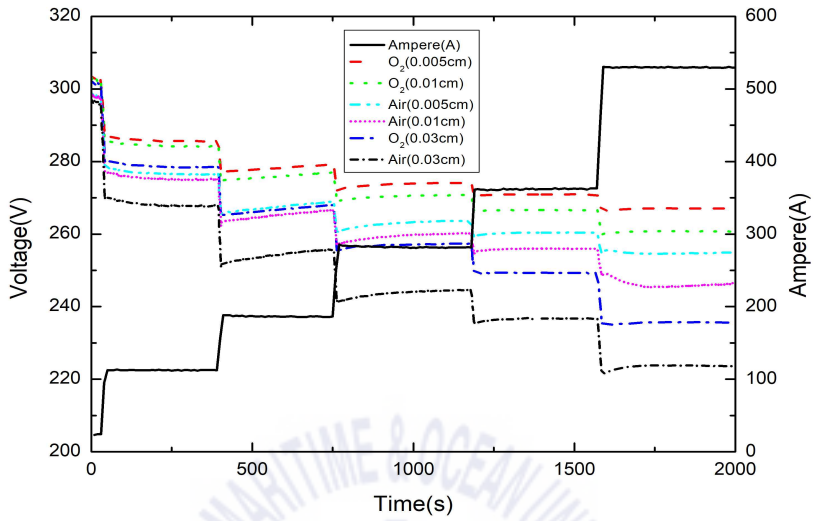


Fig. 5.19 Comparison of model voltage according to various membrane thickness

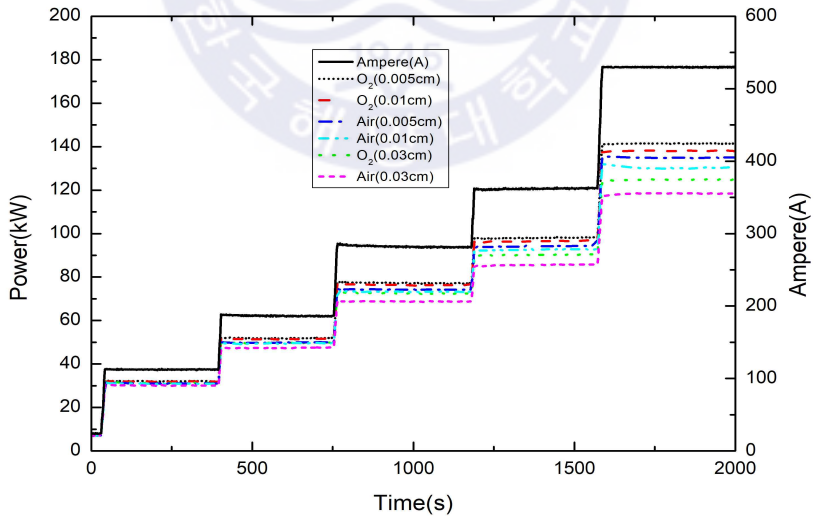
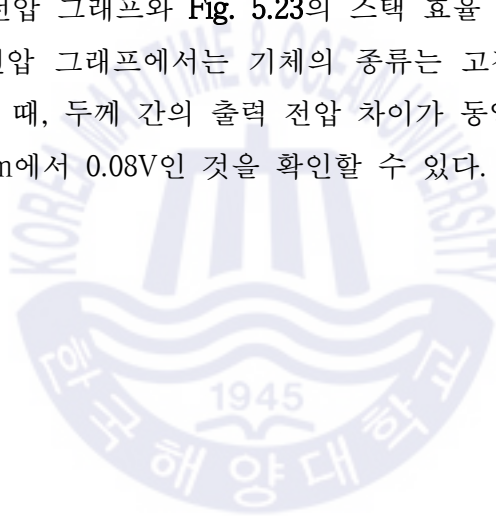


Fig. 5.20 Comparison of model power according to various membrane thickness

Fig. 5.21은 전해질막 두께 변화에 따른 Overvoltage를 비교하였다. 개회로 전압과 활성화 손실전압의 경우 전해질막 두께 변화에 무관하였으며 그래프에는 각각 한 가지의 경우만을 표기하였다. 개회로 전압 및 활성화 손실전압의 경우 Cathode 측 공급 기체에 따라 일정하며 전해질막 두께에 따른 저항 손실전압은 Cathode 측 공급 기체에 관계가 없으며 전해질막의 두께에 의해 결정된다. 그렇기 때문에 개회로 전압 및 활성화 손실전압의 차이에서 발생하는 전압 차를 제외하면 전해질막 두께에 따른 전압 차이는 산소와 공기 운전 시 동일하다. 전해질막 두께 0.03, 0.01, 0.005cm인 경우 각각의 저항 손실전압은 전 부하 운전 시 0.12, 0.04, 0.02V로 차이를 나타내었다.

Fig. 5.22의 단 셀 전압 그래프와 Fig. 5.23의 스택 효율 그래프는 유사한 경향을 보인다. 단 셀 전압 그래프에서는 기체의 종류는 고정하고 두께만 변화를 주었을 시 전 부하일 때, 두께 간의 출력 전압 차이가 동일하게 0.005~0.01cm에서 0.02V, 0.01~0.03cm에서 0.08V인 것을 확인할 수 있다.



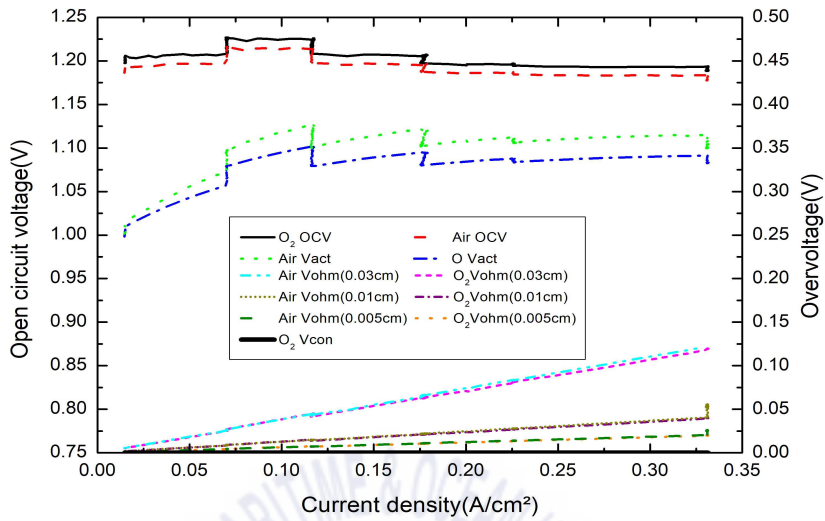


Fig. 5.21 Comparison of model overvoltage according to various membrane thickness

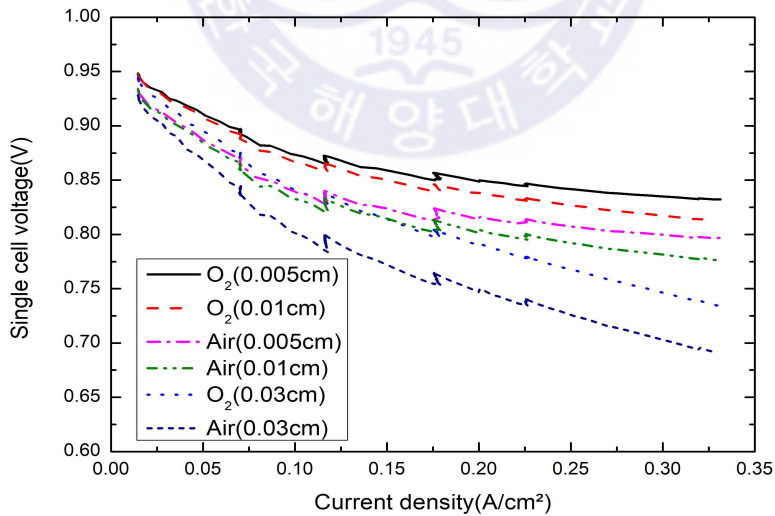


Fig. 5.22 Comparison of model I-V curve according to various membrane thickness

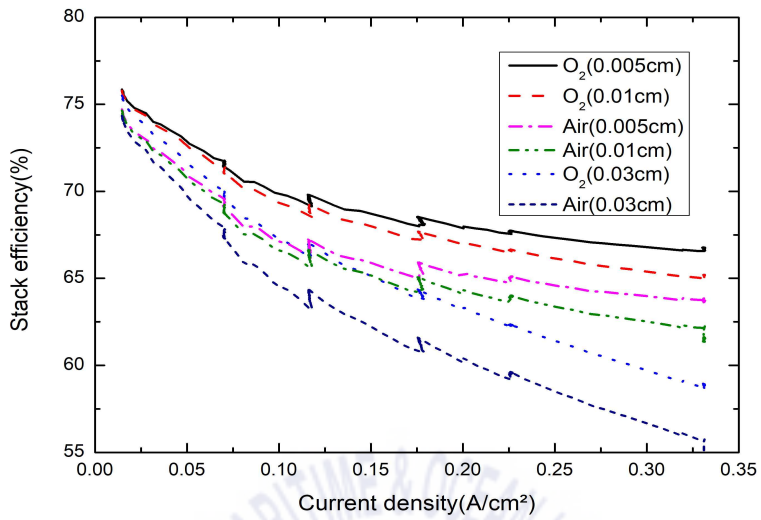
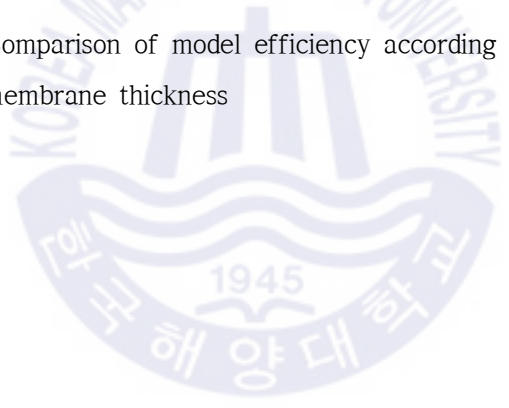


Fig. 5.23 Comparison of model efficiency according to various membrane thickness



5.2.5 스택의 열용량에 따른 영향

스택의 열용량은 스택의 운전온도에 근사한 75°C의 물의 비열, 4.20kJ/kgK 그리고 상용화된 100kW급 연료전지의 스택 시스템 무게의 근사치인 98.571kg의 값을 기준으로 1K 변화에 필요한 열량, 414000J/K를 기본으로 하였으며 재질 변화를 고려하여 ±20% 했을 때의 온도 변화와 그에 따른 운전 결과의 차이를 확인하고자 하였다. Table 5.6은 운전 조건이다.

Fig. 5.24는 스택의 열용량 변화에 따른 출력 전압 및 출력을 나타낸다. 열용량 변경이 스택의 출력 전압 및 출력에는 영향이 없는 것을 확인할 수 있다. 공기의 경우 산소와 같이 열용량 변경에 따른 차이가 없는 것을 확인하여 그래프에서 제외하였다.

Fig. 5.25는 스택 열용량 변화에 따른 Overvoltage를 나타내며 열용량의 변화에 따른 차이가 없는 것을 확인하였으며 그에 따라 Fig. 5.26의 단 셀 전압 그래프, Fig. 5.27의 스택 효율 그래프 역시 조건별 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 5.28은 스택의 열용량 변화에 따른 스택의 온도 변화를 나타낸다. 열용량이 작을 수록 스택의 온도 변화가 더 급격하게 변하는 것을 확인 가능하며 운전 중 발생하는 온도 차이가 스택의 결과에 영향을 미칠 정도의 변화는 아님을 알 수 있다.

Table 5.6 Simulated conditions according to thermal mass of stack

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
	Thickness of membrane [cm]	0.03
	Thermal mass of stack [J/K]	331200, 414000, 496800
Pressure	Cathode Inlet [Pa]	253312
	Anode Inlet [Pa]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

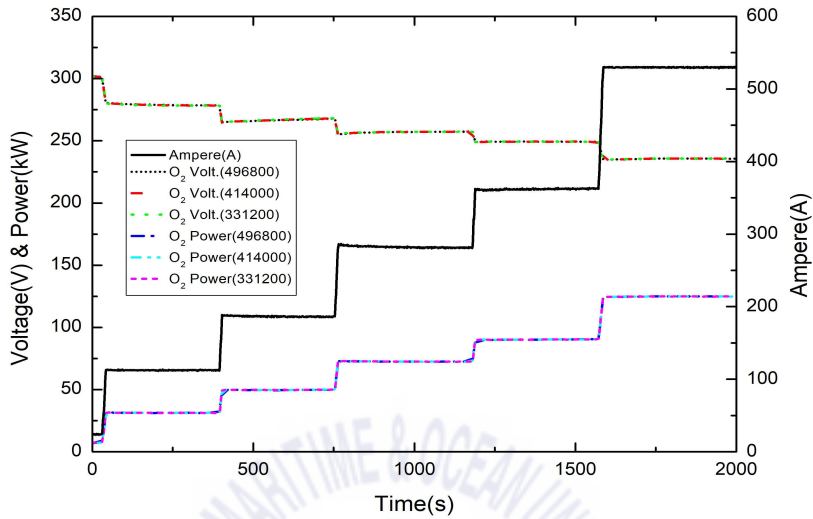


Fig. 5.24 Comparison of model voltage and power according to various thermal mass

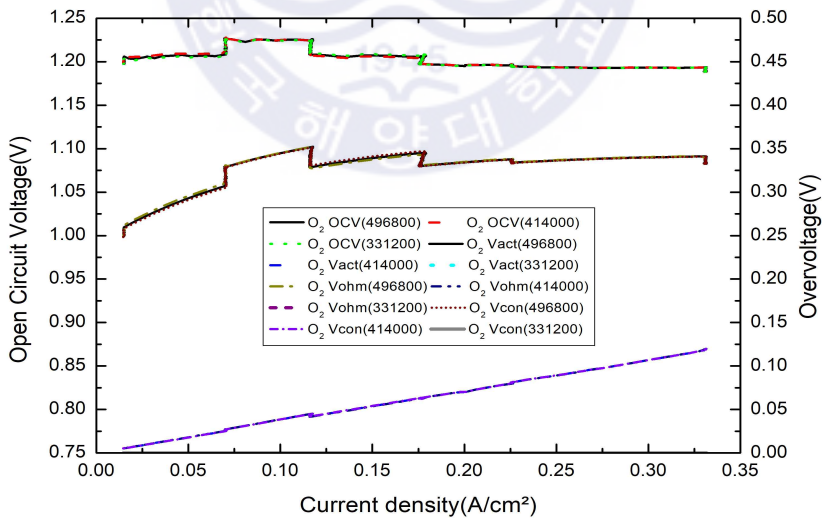


Fig. 5.25 Comparison of model overvoltage according to various thermal mass

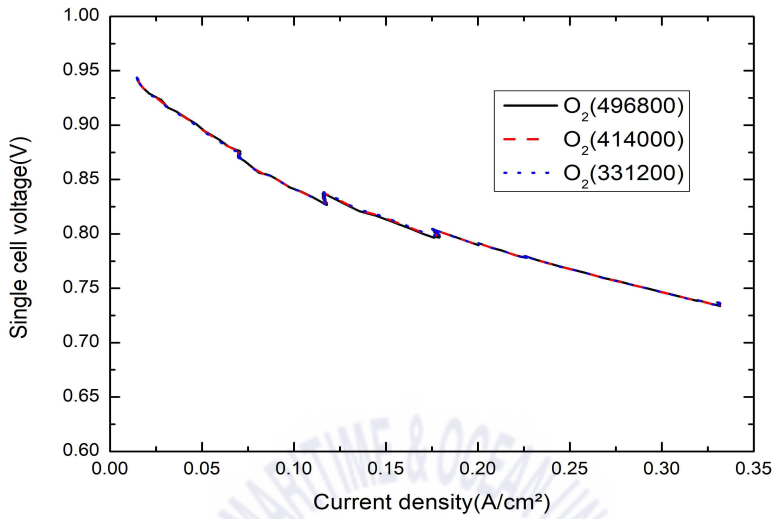


Fig. 5.26 Comparison of model I-V curve according to various thermal mass

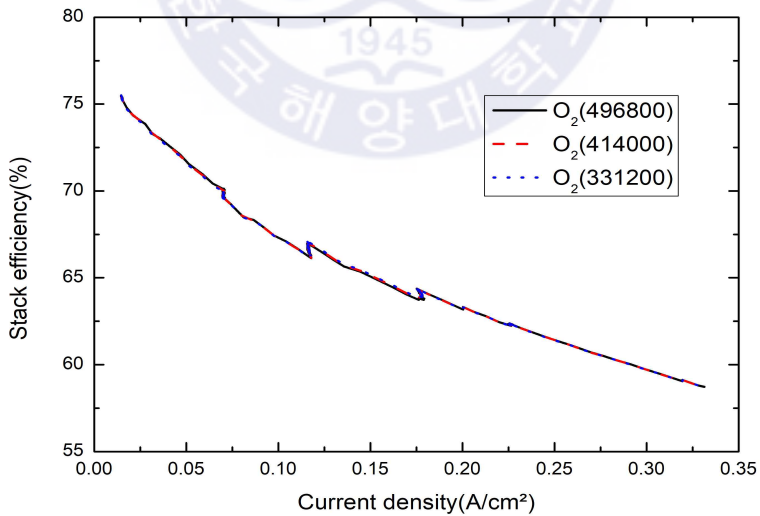


Fig. 5.27 Comparison of model efficiency according to various thermal mass

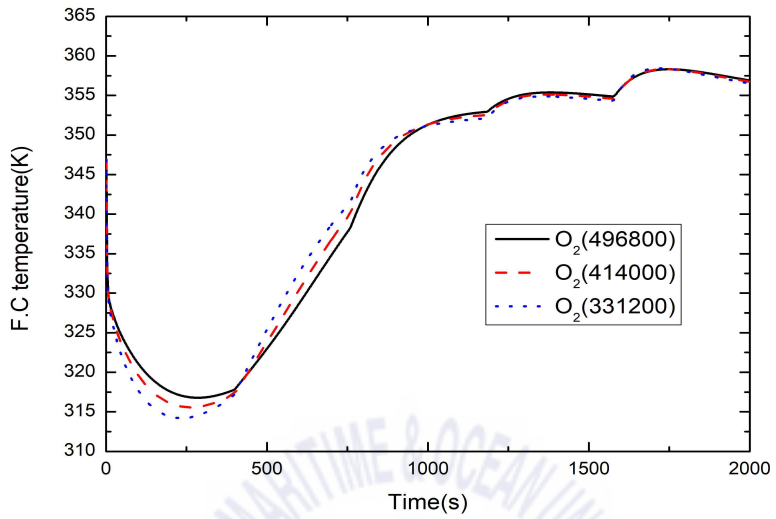
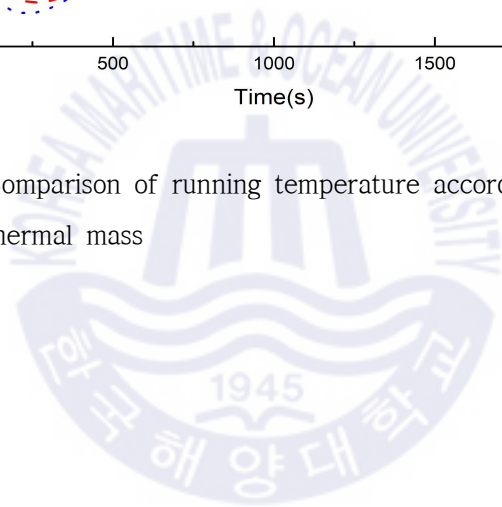


Fig. 5.28 Comparison of running temperature according to various thermal mass



5.2.6 스택과 냉각매체 사이 열전달계수에 따른 영향

스택과 냉각매체 사이의 열전달계수는 물의 강제대류를 통한 냉각으로 가정하여 열전달계수 값으로 5000W/K 을 기본 입력값으로 사용하였다. Table 5.7은 냉각매체와 냉각 조건의 변동을 고려하여 열전달계수 값을 $\pm 20\%$ 했을 때의 시뮬레이션의 운전 조건이다.

Fig. 5.29은 스택과 냉각매체 사이의 열전달계수 변화에 따른 출력 전압 및 출력 그래프이다. 열전달계수의 변경이 스택의 출력 전압 및 출력에는 영향이 없는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5.30의 산소 이용 시 Overvoltage 그래프, Fig. 5.31의 단 셀 전압 그래프, Fig. 5.32의 스택의 효율 그래프에서도 조건의 변화와 관계없이 운전결과는 동일하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.33은 열전달계수 변화에 따른 스택의 온도변화를 나타낸다. 열전달계수가 큰 만큼 부하에 따른 온도 변화가 더 급격한 것을 확인할 수 있으나 그 영향이 스택의 운전 결과에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

Table 5.7 Simulated conditions according to coefficient of heat transfer to cooling media

Model	Calculation condition and unit	Data
PEMFC stack	Number of cells [-]	320
	Maximum hydrogen conversion rate [-]	0.8
	Operating temperature of stack [K]	353
	Active cell area of one cell [m^2]	0.16
	Thickness of membrane [cm]	0.03
	Thermal mass of stack [J/K]	414000
	Coefficient of heat transfer to cooling media [W/K]	4000, 5000, 6000
Pressure	Cathode Inlet [P_a]	253312
	Anode Inlet [P_a]	253312
Stoichiometric ratio	Fuel [-]	1.2
	Oxidant [-]	2
Humidity	Anode Inlet gas [%]	100
	Cathode Inlet gas [%]	100

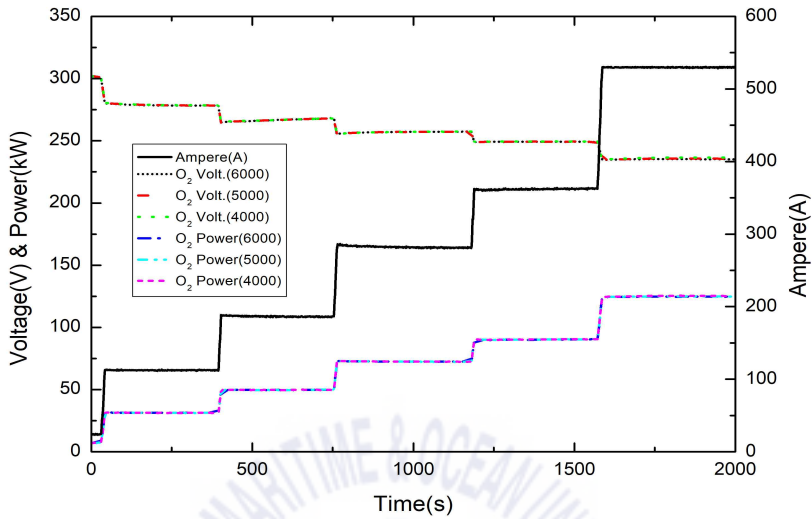


Fig. 5.29 Comparison of model voltage and power according to various coefficient of heat transfer to cooling media

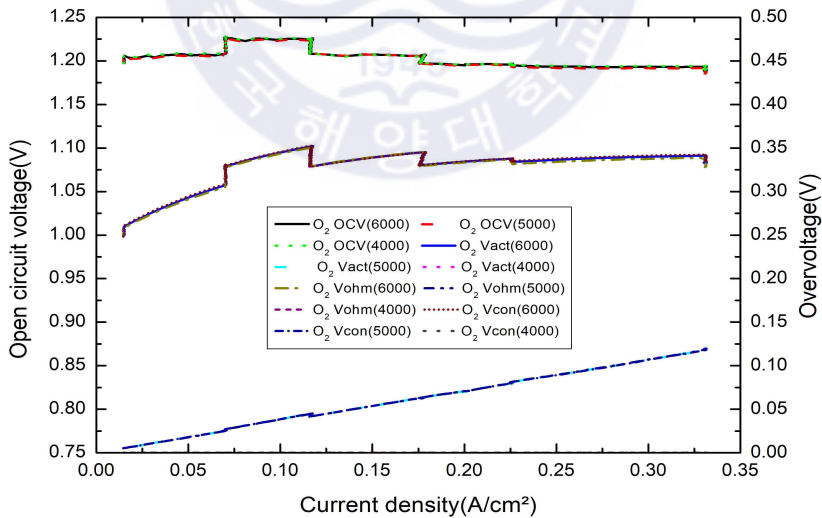


Fig. 5.30 Comparison of model overvoltage according to various coefficient of heat transfer to cooling media

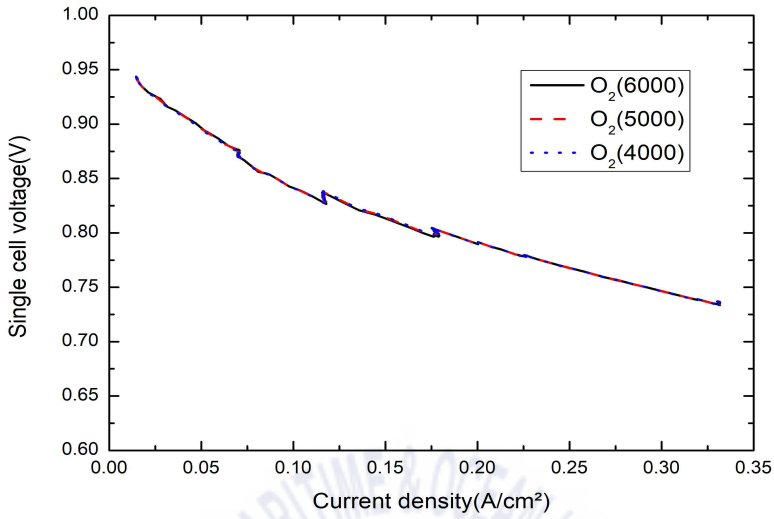


Fig. 5.31 Comparison of model I-V curve according to various coefficient of heat transfer to cooling media

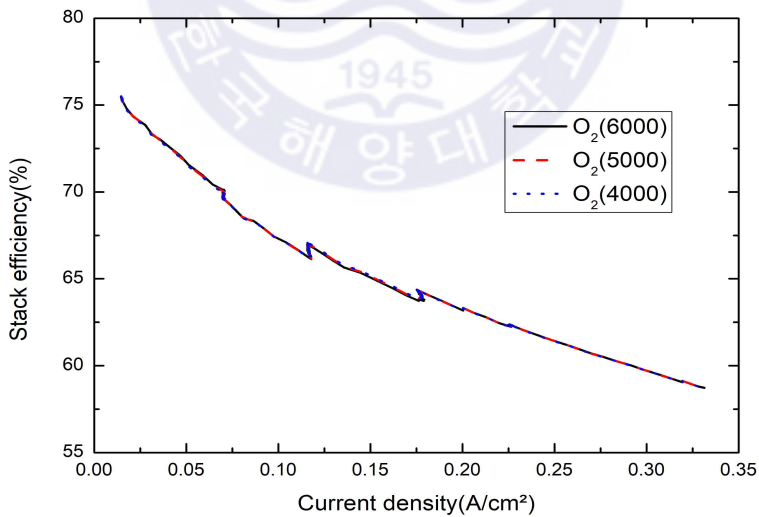


Fig. 5.32 Comparison of model efficiency according to various coefficient of heat transfer to cooling media

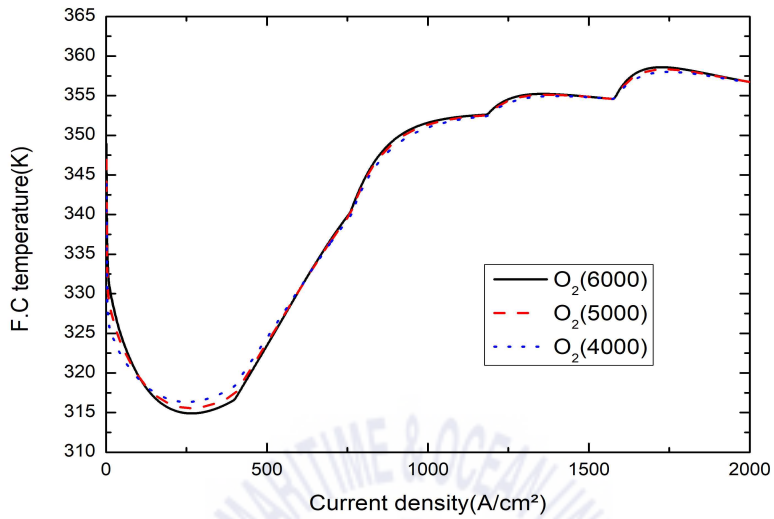
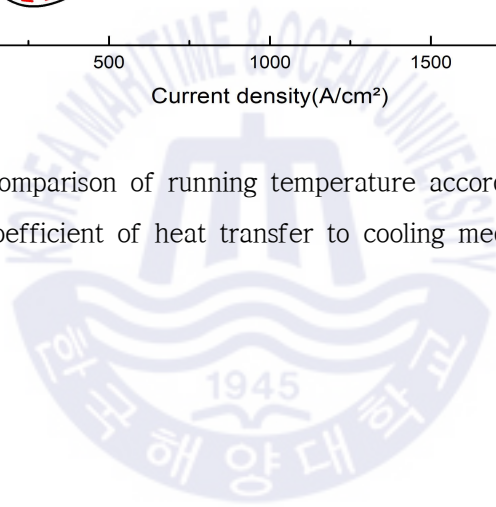


Fig. 5.33 Comparison of running temperature according to various coefficient of heat transfer to cooling media



5.3 연료전지 모델, HIL 시뮬레이션 및 실험 결과 비교

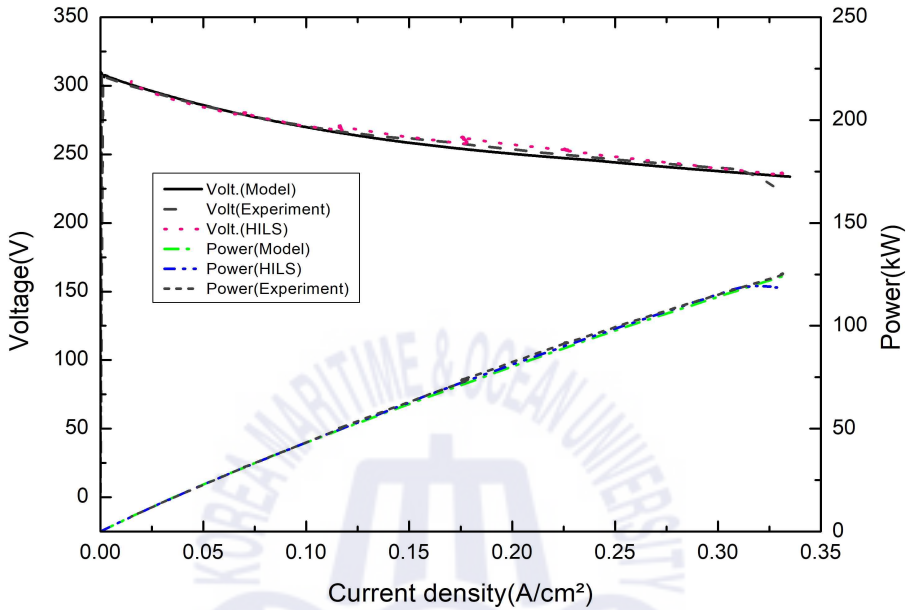


Fig. 5.34 Comparison of voltage and power among model, HIL simulation and experiment

Fig. 5.34은 연료전지 모델, HILS 시뮬레이션과 실제 실험 결과를 비교한 그래프이며 Table 5.1의 운전조건을 사용하였다. 상부의 감소하는 경향의 선은 전류밀도에 따른 스택 전체의 출력 전압 선이며 하부의 증가하는 경향의 선은 전류밀도에 따른 스택의 출력 선이다. 출력 전압 선에서 실험 결과 중 일부 돌출부는 부하를 점진적으로 올린 것이 아닌, 순간적인 부하 상승으로 형성된 부분이나 전체적으로 실험 결과를 기반으로 한 연료전지 모델과 그를 기반으로 한 HIL Simulator의 실시간 모델 3가지의 결과가 전체 구간에서 거의 동일한 운전 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 스택 출력의 경우도 3가지의 결과 값이 차이가 거의 없이 동일하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 앞서 구축한 HIL Simulator를 활용한 시뮬레이션이 실제 실험 결과를 반영한 실시간 시뮬레

이선 방법으로써 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 HIL Simulator를 활용한 결과는 입력 부하를 점진적 증감한 것이 아닌 순간적인 부하 변동을 하며 얻은 데이터 임에도 전류밀도에 따라 정리한 결과 동일한 출력 전압 및 출력 결과를 얻었다는 점에서, 급발진 또는 급정지와 같은 급격한 부하변동 상황을 시험할 때에도 이 HIL Simulator의 활용 가능성을 확인할 수 있다.



제 6 장 결론

6.1 결론

본 연구는 실험 데이터를 바탕으로 한 120kW급 PEMFC 모델을 개발하여 모델을 이용한 스택의 운전 특성을 분석하고, 모델을 이용하여 실시간 시뮬레이션 방법인 HILS 시스템을 구축하여 실용성을 확인하기 위한 연구를 진행하였다.

실험 데이터를 기반으로 한 모델링의 경우 부하에 따른 일부 구간의 출력 전압의 차이가 있으나 거의 유사한 운전 특성을 나타내어 모델 자체의 유용성을 확인하였다. 연료전지 모델의 조건별 시뮬레이션 결과, Cathode 측 공급 기체를 산소로 하여 스택 운전온도가 높은 경우, 공급 연료/기체의 압력이 높은 경우, 스택의 반응 면적이 큰 경우, 전해질막의 두께가 얇은 경우에 출력 전압 및 출력이 높은 것을 확인하였다. 스택의 온도에 영향을 줄 수 있는 스택의 열용량, 냉각매체와의 열전달계수는 스택의 출력과는 관계가 없는 것을 확인하였다.

또한 이 모델을 HIL Simulator를 통하여 실시간 시뮬레이션 하여 동일한 결과를 얻었으며, 이를 통한 HIL Simulator를 이용한 실시간 시뮬레이션의 사용 가능성을 확인하였다.

구체적인 연구 결과는 아래와 같다.

(1) 120kW PEMFC 모델링 결과

- 실제 실험 데이터를 기반으로 한 순수 수소, 산소 공급 방식의 120kW PEMFC 모델링을 하였으며 부하에 따라 실험 및 모델의 출력 전압이 1.9%(4.8V)까지 차이가 발생하였으나 대부분의 운전 영역에서 유사한 결과를 나타내었다.

(2) 연료전지 모델 운전조건 별 시뮬레이션 결과

- 연료전지 모델 시뮬레이션은 Cathode 측 공급 기체는 산소, 공기 두 가지의 경우로 시뮬레이션을 진행하였으며 Anode 측 공급 기체는 수소를 이용하였다. Cathode 측 공급 기체를 산소로 했을 경우 출력 전압이 더 높았다.
- 스택의 운전온도가 증가함에 따라 출력 전압이 증가했으며 산소보다 공기 운전 시 온도 별 출력 전압의 차이가 커 온도의 영향을 더 크게 받았다.
- Cathode 및 Anode 측 공급 기체, 연료 압력이 증가함에 따라 산소 운전 시의 출력 전압 차이는 없었으나 공기 운전 시 출력 전압은 영향을 크게 받았다.
- 스택의 반응 면적이 증가함에 따라 출력 전압이 증가했으며 그 차이는 Cathode 측 공급 기체와 관계없이 일정하였다.
- 스택 전해질막의 두께가 얇을수록 출력 전압이 증가했으며 그 차이는 Cathode 측 공급 기체와 관계없이 일정하였다.
- 스택의 열용량의 변화에 따른 스택의 온도 변화로는 출력 전압의 차이를 일으키지 않았다.
- 스택과 냉각 매체의 열전달계수의 변화에 따른 스택의 온도 변화로는 출력 전압의 차이를 일으키지 않았다.

(3) HILS 시뮬레이션 결과

- HILS 시뮬레이션은 연료전지 모델의 시뮬레이션 결과와 동일하였으며 실시간 시뮬레이션 용도의 Simulator로 적합한 것을 확인하였다.

감사의 글

항상 저를 인도하시고 함께하시는 하나님 아버지께 감사와 영광을 돌립니다.

이 논문을 쓰기까지 지도하여 주시고 격려를 아끼지 않으신 박상균 교수님께 감사의 말씀을 올려드립니다. 논문의 심사를 맡아주시고 학문의 과정과 인생의 조언까지 전해주시신 김명환 교수님, 길병래 교수님께 존경과 감사의 마음을 올립니다. 또한 학문에 대한 많은 도움을 주셨던 교수님들께 역시 감사를 드립니다.

2년간의 학문의 과정 중, 함께 근무하며 많은 도움이 되어준 김경필, 김경환, 전현민, 방은신, 김지희, 황준영, 허원식, 정자영 님께 감사의 인사를 전합니다. 대학원 과정에 대해 도움을 준 박성철, 손광호, 김민욱 님께 감사를 드립니다.

언제나 저를 응원하며 함께해주는 아내, 이제 막 태어난 아들에게 감사와 사랑을 전합니다. 제 의사를 존중해주시며 격려해주시는 아버지, 무언의 격려를 보내주신 장인, 장모님께 헤아릴 수 없는 감사를 드립니다.

일일이 언급하지 못하였으나 신경써주시고 베풀어 주신 관심에 감사드립니다.

2019년 12월 24일

김종인 올림

참고문헌

- [1] United Nations Climate Change Conference (UNFCCC), 2015. *Adoption of the Paris agreement-Proposal by the President-Draft decision, 12 Dec 2015. Paris: France.*
- [2] International Maritime Organization (IMO), 2013. *Report of the Marine Environment Protection Committee on its 72nd Session,*
- [3] Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV GL), 2017. *Study on the use of fuel cells in shipping,* Hamburg: DNV GL
- [4] Choi, C.H. et al., 2016, Development and demonstration of PEM fuel-cell -battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), pp.3591-3599.
- [5] Ryan O' Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals,* John Wiley & Sons(2008)
- [6] Christian Dufour et al., 2007, Modern Hardware-in-the-Loop Simulation Technology for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles,
- [7] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained,* Wiley(2003)
- [8] Andreas Vath et al., 2006, Dynamic modelling and hardware-in-the-loop testing of PEMFC, *Journal of Power Sources*, 157, pp.816-827
- [9] Jay Tawee Pukrushpan, 2003, Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors
- [10] National Instruments, Products [Online] Available at: <http://ni.com/ko-kr/shop/select/pxi-controller>

[11] Francesco Turoni et al., 2005, Model based design of a controller for fuel cell systems, Shaker Verlag Aachen, pp.116-124

