



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

전자제어 디젤엔진의 성능최적화를
위해 적용한 요인배치법의 유효성
검토



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

김 민 종

공 학 석 사 학 위 논 문

전자제어 디젤엔진의 성능최적화를
위해 적용한 요인배치법의 유효성
검토

지도교수 정 석 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

김 민 중

김민종의 공학석사 학위논문을 인준함

2018년 2월



주 심 공 학 박 사 고 대 권 (인)

위 원 공 학 박 사 김 영 복 (인)

위 원 공 학 박 사 정 석 호 (인)

목 차

Abstract	3
기호 설명	4
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적.....	1
2. 실험장치 및 방법	4
2.1 실험장치	4
2.2 실험방법	16
2.2.1 실험계획법 및 요인배치법	16
2.2.2 실험방법	21
3. 결과 및 고찰	27
3.1 요인배치법 주효과도 결과 비교	27
3.2 연료소비량에 측정에 영향을 미치는 외부요인 파악 ...	37
4. 결 론	43
참고 문헌	43



Validity examination of factorial design to be applied for performance
optimization on electronic control diesel engine

Min Jong-Kim

Department of Mechanical System Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In previous experiments, the engine optimization was carried out through the partial factoring method and the response surface method. however, since the experiment was conducted in a state where the level of the factors was not appropriate, the central point was not found in the reaction surface analysis method. as a result, proper optimization of the diesel engine performance test was not obtained. In this study, the effectiveness of the partial factorial method and the full factorial method were examined in the performance test of the electronically controlled diesel engine. PI, PCR, IT, EGR, and VGT were used to control the electronically controlled diesel engine. NO_x, CO, and SFC were used as response values for the five parameters. as a result of the comparative analysis of the main effect by applying the partial factorial method and the complete factorial method, it was possible to quantitatively evaluate the data of nitrogen oxide and carbon monoxide applied partial factorial method and complete factorial method. However, the fuel consumption rate could not be quantitatively evaluated. Therefore, we conducted experiments on external factors that affect fuel consumption measurement. The external factors were selected by the influence of the wind generated by the cooling fan and the vibration caused by the engine. experimental results show that the difference of fuel consumption is 0.79g when the windshield and vibration pad are not attached and when they are attached. However, it was confirmed that the error is significantly smaller than the error in the main effect. It is considered that there are few external factors influencing the electronic balance in fuel consumption measurement. The results of the factoring method application in the diesel engine performance test were validated for the partial factoring method but it is not valid for the partial factoring method in the fuel consumption ratio (SFC) measurement.

기호 설명

<i>DF</i>	Degree of freedom
<i>D.O.E</i>	Design of experiment
<i>ECU</i>	Engine control unit
<i>I.T</i>	Injection timing
<i>PCR</i>	Common rail pressure
<i>P.I</i>	Pilot injection
<i>VGT</i>	Variable geometry turbocharger
<i>EGR</i>	Exhaust gas recirculation
<i>NO_x</i>	Nitrogen Oxides
<i>CO</i>	Carbon Oxides
<i>SFC</i>	Specific fuel oil consumption
<i>RPM</i>	Revolution per minute
<i>ECU</i>	Electronic control unit
<i>CRDI</i>	Common rail direct injection
<i>Hum</i>	Humidity
<i>Amb.T</i>	Atmospheric temperature

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

현재 우리나라는 내부 자원이 부족하고 내수시장이 작아 수출에 크게 의존하는 상태이다. 따라서 전반적인 산업 영향에 효과가 큰 자동차 산업은 제조업 분야에서 매우 큰 비중을 차지하게 되었다. 2017년 국내 완성차업체 5개사의 종업원 수가 지난 5년간 8.6%가 증가하였으며, 12만 6000명의 종사자가 완성차 업체에서 종사중이다. 자동차 산업에 관련된 종사자 수는 183만 명에 이른다.¹⁾ 또한 우리나라 총 고용인원 중 7.3%에 이르며, 우리나라 전체 수출액의 14.7%에 해당하는 비중을 차지하고 있다. 이러한 여건에 따라 국내 자동차 수는 점점 증가하여 2017년 기준으로 2200만대가 육박하고 있다²⁾. 이렇듯 현재 자동차 산업은 우리나라 주요 산업으로 자리 잡고 있다. 하지만 국내 자동차 수가 증가됨에 따라, 배출가스로 인한 대기 오염과 인체에 유해성을 미치는 유해성가스 증가로 인한 배기가스 배출량에 대한 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 현재 국내 자동차 배기가스규제는 유럽연합이 도입한 배기가스 규제단계인 유로6(EURO 6)가 발동되었다. 대표적으로 디젤 엔진을 사용하는 대형 자동차 NOx 배출량이 유로5인 2g/kwh에서 유로6가 발동됨에 동시에 0.4g/kwh로 감소하였으며, 소형 자동차 기준으로 NOx 배출량이 유로5에서 0.18g/kwh에서 유로6가 발동되어 0.08g/kwh로 50% 이상 배기가스 규제가 강화되었다³⁾.

초기 디젤 엔진은 기계식으로 연료를 분사하였지만, 점차 강화되는 배기가스 규제로 인하여 기존 기계식 연료분사 방식을 탈피하여 전자적으로 연료 분사 시기, 연료 분사 압력, 등 다양한 제어가 가능한 커먼레일 연료 분사(Common Rail Direct Injection C

RDI) 시스템으로 변화 하였다⁴⁾.

다양한 디젤 엔진을 가진 동력원에 커먼레일 연료 분사 시스템을 적용하여 디젤 엔진의 단점으로 여기던 소음 및 진동의 저감 뿐 만 아니라 연료 분사시기를 제어하여 분사시기 최적화에 따른 배출가스저감 및 연소효율을 증가 시킬 수 있었다. 나아가 UREA-SCR 및 후처리 장치 활성화 등 다양한 전자제어를 하는 커먼레일 디젤엔진은 ECU(Electronic control unit)에 제어맵이 셋팅 되어 최적화를 가능하게 되었다. 초기 1세대 커먼레일 차량들의 최대 분사압력이 1000bar를 상회하였으나⁵⁾, 배기가스 규제가 강화됨으로 인해 연료 분사압력을 올림으로써 연료 분사시간 단축 및 연료의 미립화로 인한 연료, 공기 혼합도가 높아져 완전연소를 도와주며, 배기가스 유해물질 배출량을 저감시킬 수 있다. 최근에는 최대 2000bar이상까지 사용하고 있는 실적이다⁶⁾.

이러한 배기가스저감 및 연료소비량 등 엔진 성능 향상에 대한 연구는 국내외에서도 수많은 연구가 진행되고 있다. 해외 자동차 제조사중 메르세데스 벤츠에서는 디젤엔진의 무공무진한 영역을 강조하며 30억 유로를 투자하여 디젤엔진 효율 증가에 대한 연구를 진행하고 있었으며, 디젤엔진의 효율성과 전기모터를 결합한 디젤플러그인 하이브리드도 개발 중에 있다.⁷⁾ 국내 자동차 제조사인 기아자동차는 2016년도부터 3000cc 디젤엔진을 사용하는 모하비 차량에 배기가스 후처리 장치인 선택적환원촉매 장치 (Selective Catalytic Reduction)를 적용하여 국내 최초로 승용디젤엔진에 도입되었다. 또한 PM저감을 위한 배기가스후처리장치 (Diesel Particulate Filter)와 희박질소촉매 (Lean NOx trap)를 양산차에 적용하여 배기가스 저감에 대한 노력이 이루어지고 있다. Diesel-CNG 혼소엔진에서 혼소율과 발열량에 따른 연소 및 배출가스 특성 연구⁸⁾와 커먼레일 디젤엔진의 DPF와 LNT 재생 중 질소산화물 및 입자상 물질 생성 억제 제어에 관한 연구

등⁹⁾ 국내외에서 디젤엔진에 대한 연구가 수많은 실험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 엔진 효율 및 배기가스 저감에 대한 노력이 지속적으로 이루어지고 있는 상태이다.¹⁰⁾ 하지만 적절한 실험계획법을 적용하지 않고 무작정 실험을 진행할 경우 비용 및 시간이 무한정으로 늘어나게 된다. 이를 방지하고자 적절한 실험계획을 적용하여 실험을 진행하면 실험에 들어가는 시간 및 비용을 저감할 수 있다.¹¹⁾

앞선 연구인 비에스테르화 바이오디젤 5% 혼합유의 성능최적화를 위한 실험계획법 적용에 관한 연구¹²⁾를 진행하였다. 디젤엔진 제어를 위한 각 부하에서의 인자들의 수준이 적절하지 않기 때문에, 부분요인배치법을 적용하여 인자들의 수준이 적절하다고 판단하여 반응표면분석법으로 엔진성능 최적화 실험을 진행하였다. 하지만 엔진제어에 필요한 인자들의 수준이 적절하지 못한 상태에서 실험을 진행하였기 때문에 관심영역에서 중앙점이 부재하였다. 그 결과 디젤엔진 성능실험에 있어 적절한 최적화 도출이 미흡하였다.

따라서 본 연구에서는 전자제어 디젤엔진 성능실험에 보다 정확한 데이터를 취득하기 위하여 부분요인배치법과 완전요인배치법을 동시에 진행하여 어떠한 방법이 디젤엔진의 성능실험에 적용하기 좋은 것인지 유효성을 검토하고자 하였다. 하지만 요인배치법을 적용한 실험결과에서 유해배기배출물에 비해 연료소비율의 결과는 편차가 컸다. 그 원인을 파악하기 위하여 연료소비량을 측정하는 방법에 영향을 미치는 요인을 나누어 실험을 하였고, 전자제어에 영향을 미치는 외부 요인을 나누어 실험을 하였다. 두 실험을 통하여 전자제어 디젤엔진의 성능실험에 있어서 요인배치법의 유효성을 검토하였다.

제 2 장. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 계통도는 Fig 2-1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 (주)현대자동차에서 제작한 D4EA 4기통 전자제어 디젤엔진이다. 냉각방식은 수냉식을 사용하며, 커먼레일 분사장치 및 전자제어장치를 적용한 가변 과급디젤엔진이다. 보어와 스킴크는 83mm와 93mm인 언더스퀘어 엔진이며, 배기량은 1991cc이다. 4000rpm에서 84kw의 출력이 나오며, 최대토크는 22.8kg.m 이다. 하지만 본 실험은 100% 부하에서 실험에 실시하지 않고 25%부하인 5.7kg.m에서 2000rpm을 고정하여 실시하였기 때문에 최고출력을 12kw로 설정하였다. Table. 2-1는 엔진 제원을 나타낸다.

동력계는 (주)환웅기전에서 제작한 와전류식 동력계인 DYRTEK-130을 사용하였으며, 최대 131kw/10000rpm 까지 측정 가능하다. 와전류식 동력계의 제원은 Table 2-2에 나타내었다. 부하 조정방식은 회전수 고정과 토크 고정 두 가지 방법이 있으나, 본 실험에서는 회전수를 고정하고 토크를 변화시켜 실험을 진행하였다.

디젤엔진을 운전하기 위한 ECU를 제어하기 위해 Woodward사의 MotoHawk Control Solution을 사용하였다. 하드웨어는 전자제어유닛인 ECM565-128과 범용인젝터 드라이버인 UID800을 사용하였다. 시물링크 기반 개발 소프트웨어인 MotoHawk로 제어알고리즘을 구성하였다. 스프레드시트 기반인 사용자 인터페이스인 MotoTune을 이용하여, 선택된 5가지 인자 이외 엔진구동에 필요한 인자를 제어를 하기 위하여 PC에서 실시간 제어가 가능하도록 구성하였다.

본 실험에서는 5가지 인자를 선택하여 제어하도록 구성되어 있는데, 5가지 인자는 커먼레일 분사압력 (PCR : Pressure Common-Rail), 점화시기 (IT : Ignition Timing), 다단분사 (PI : Pilot Injection), 가변형상터보차저 (VGT : Variable Geometry Turbocharger), 배기가스재순환장치 (EGR : Exhaust Gas Recirculation)이다.

엔진상태를 모니터링하기 위하여 엔진 내 외부의 압력 및 온도센서를 설치하여 계측을 하였다. 압력센서는 Kistler사의 6052C와 4045C를 사용하여 압력을 측정하였다. 압력은 1번 실린더의 연소실 압력과 흡배기압력을 측정하였다. 압력센서 만의 출력이 작기 때문에 Kistler사의 컨디셔너인 5011B를 이용하여 신호를 증폭시켰다. 압력센서의 제원은 Table 2-3에 나타내었다. 압력신호는 Omron사의 E6B2-CWZ6C 로터리엔코더를 이용하여 크랭크각 0.5° 당 하나씩 신호를 취득하여 National instrument사의 NI 6123 AD 컨버터를 이용하여 100 싸이클을 양상블 평균으로 나타내기 위해 PC에 저장하였다.

온도센서는 K-type 열전대를 이용하여 냉각수 입구 및 출구, 흡기 및 배기가스, 연료 및 윤활유의 온도를 측정하였다. 온도센서의 신호는 1초 당 하나의 신호를 취득하여 PC에 5분 동안 저장하였다. 압력센서와 온도센서에서 취득한 신호는 Fig. 2-2에서 나타낸 National instrument사의 소프트웨어인 Labview를 이용하여 소프트웨어를 구성한 후 PC로 저장하여 데이터를 취득하였다.

배기가스 측정은 Eutotron사의 MK-9000 모델을 사용하였다. MK-9000을 사용하여 배기가스 성분인 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 산소농도를 1초당 하나의 데이터를 3분 동안 계측하여 PC에 저장하였다. MK-9000에서 측정할 수 있는 배기가스 규격은 전체 비율 중 측정 가능한 O₂비율은 0~ 30%가 가능하고, CO는 0~

20000ppm 이고, NO_x의 측정가능한 범위는 0~ 6000ppm까지 측정이 가능하다 CO₂의 측정비율은 전체비율의 0~ 100%까지 측정이 가능하다. 가스 온도는 $-40C^{\circ} \sim +1200C^{\circ}$ 까지 측정이 가능하며, 가열식 수분, 응축수 자동제거 및 수분 전처리 시스템이 내장되어 있다. 측정 호스는 자동 $200C^{\circ}$ 가스 샘플링 가열식 히팅호스를 사용한다. 측정가능 압력은 $-250 \sim +250hpa$ 이 가능하며, 측정 가스의 유속은 $0 \sim 100m/s$ 로 측정이 가능하다. Table 2-4는 배기가스 분석기인 MK-9000에서 측정 가능한 배기가스 성분에 대한 규격을 나타낸다.

연료소비량 측정은 CAS사의 전자저울인 CUW-6200 모델을 사용하였다. 측정방식은 Webcam을 사용한 방식과 Labview를 사용한 방식으로 두 가지 방식을 사용하였다. Webcam을 이용한 방식은 Webcam을 이용하여 전자저울 디스플레이 부분을 5분간 모니터링하여 PC에 동영상 파일로 저장한 뒤 미디어플레이어를 재생하여 5분간의 연료소모량을 측정하였다. 연료의 측정단위는 질량단위로 측정하였다. 이후 더욱 정확한 계측값을 취득하기 위해 Labview를 활용하여 연료소모량 계측 프로그램을 코딩하였다. 이는 5분간 데이터를 0.2초당 계측하여 전자저울과 PC사이의 RS-232C를 통하여 통신하였으며, 계측된 데이터는 PC에 저장하였다. Table 2-5는 CUW-6200의 제원표를 나타낸다. Fig. 2-3은 Webcam을 이용하여 전자저울 디스플레이를 나타내며, Fig. 2-4는 전자저울 코딩프로그램을 나타낸다.

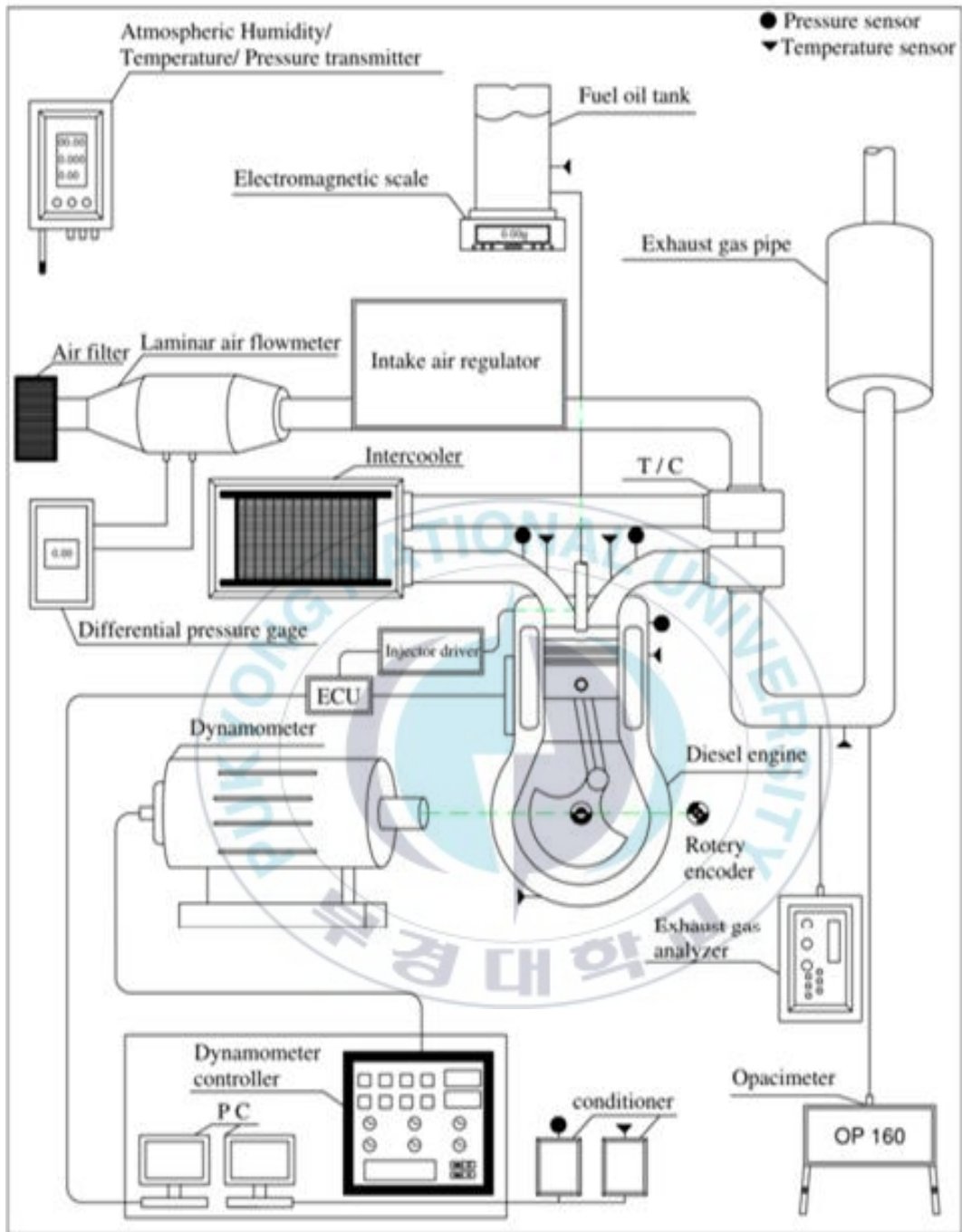


Fig. 2-1 Schematic diagram of experimental equipment

Table 2-1 Specification of tested engine

Description	Specification
Model	HYUNDAI D4EA
Engine type	Water-cooled 4 stoke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston displacement	1991cc
Bore x Stroke	83mm x 92mm
Maximum power	112/400 hp/rpm
Compression ratio	17.7

Table 2-2 Specification of tested dynamometer

Description	Specification
Model	HWANWOONG DYTEK-130
Absorption power	130Kw (180 Ps)
Absorption torque	35 kgf.m (343Nm)
Maximum speed	10,000 rpm
Rotor inertia	0.14 kg/ m^2
Weight	500 kg

Table 2-3 Specification of pressure sensor

Model		6052C	4045A
Measuring range	bar	0…250	0…200
Calibrated partial ranges	bar	0…50, 0…100, 0…150	0 … 1, 0 … 200
sensitivity	pC/bar	~20	2.5
Natural frequency (measuring element)	kHz	~160	>180
Linearity all ranges (at 23°C)	%/FSO	$\leq \pm 0.4$	$\leq \pm 0.3$
Operating temperature range	°C	-20…350	20…120
temperature min./max.		-50…400	0…140
Tightening torque	N·m	1.5	3…5(Delringasket) 12…20(coppergasket)
Connector ceramic insulator	-	M4 x 0.35	M14 x 1.25

Table 2-4 Exhaust gas analyzer

Parameter	Sensor	Range
O ₂	Electrochemical	0 - 30%
CO	Electrochemical	0 - 20000rpm
NO	Electrochemical	0 - 5000rpm
NO ₂	Electrochemical	0 - 1000rpm
NO _x	Calculated	0 - 6000rpm
SO ₂	Electrochemical	0 - 2000rpm 0 - 5000rpm
CO ₂	Calculated	0 - 100%
T _{air}	Pt100	-40 - 100℃
T _{gas}	Tc K/N	-40 - 1200/1600℃
Excess air	Calculated	1.00 - infinity
Efficiency	Calculated	1 - 120%
Smoke index	Paper filter method	0 - 9 Bacharach

Table 2-5 Specification of electronic scale

Model	CUW-6200
Maximum display (g)	6200 g
Minimum display (g)	0.01 g
Tare range (g)	1000g - 6200g
Repeatability (g)	≤ 0.01 g
Linearity (g)	± 0.01 g
Response time (s)	1.5s - 2.5s
Operation temperature (°c)	5°C - 40°C
Pan size (mm) (W x D x H)	170 x 180
Dimension (mm) (W x D x H)	190mm x 317mm x 78mm
Weight (kg)	4.6 kg
Display	LCD
Power requirements	DC12V/1AACAdapter AC220, 60Hz
DATA I/O	RS-232C

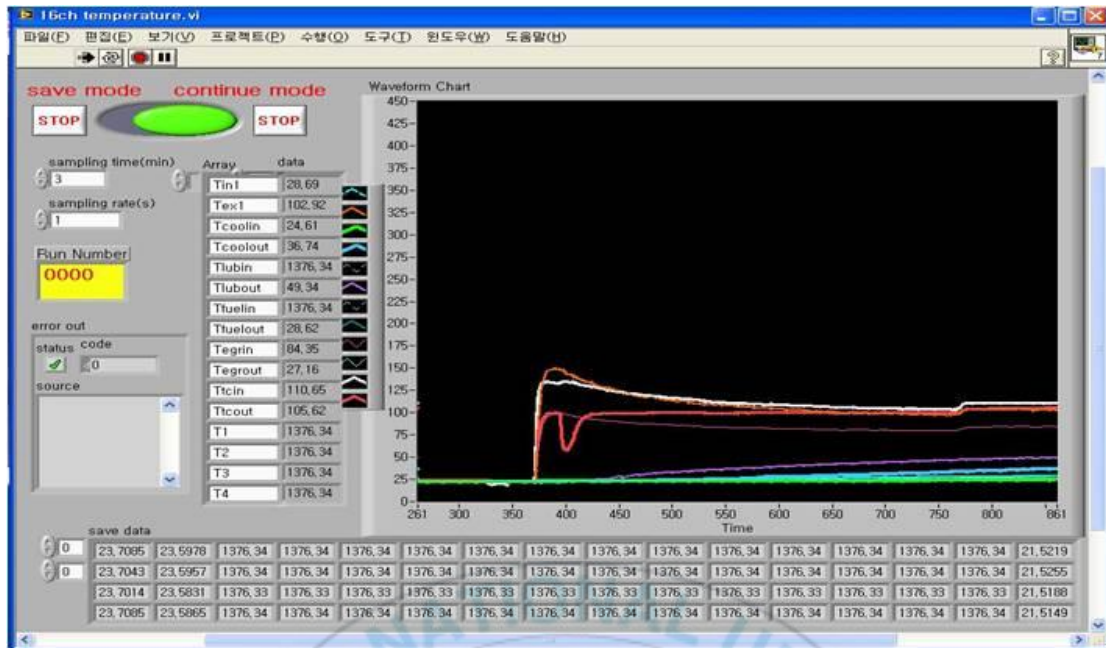


Fig. 2-2 Measurement of a various temperature with Labview



Fig.2-3 Measurement of SFC with Webcam

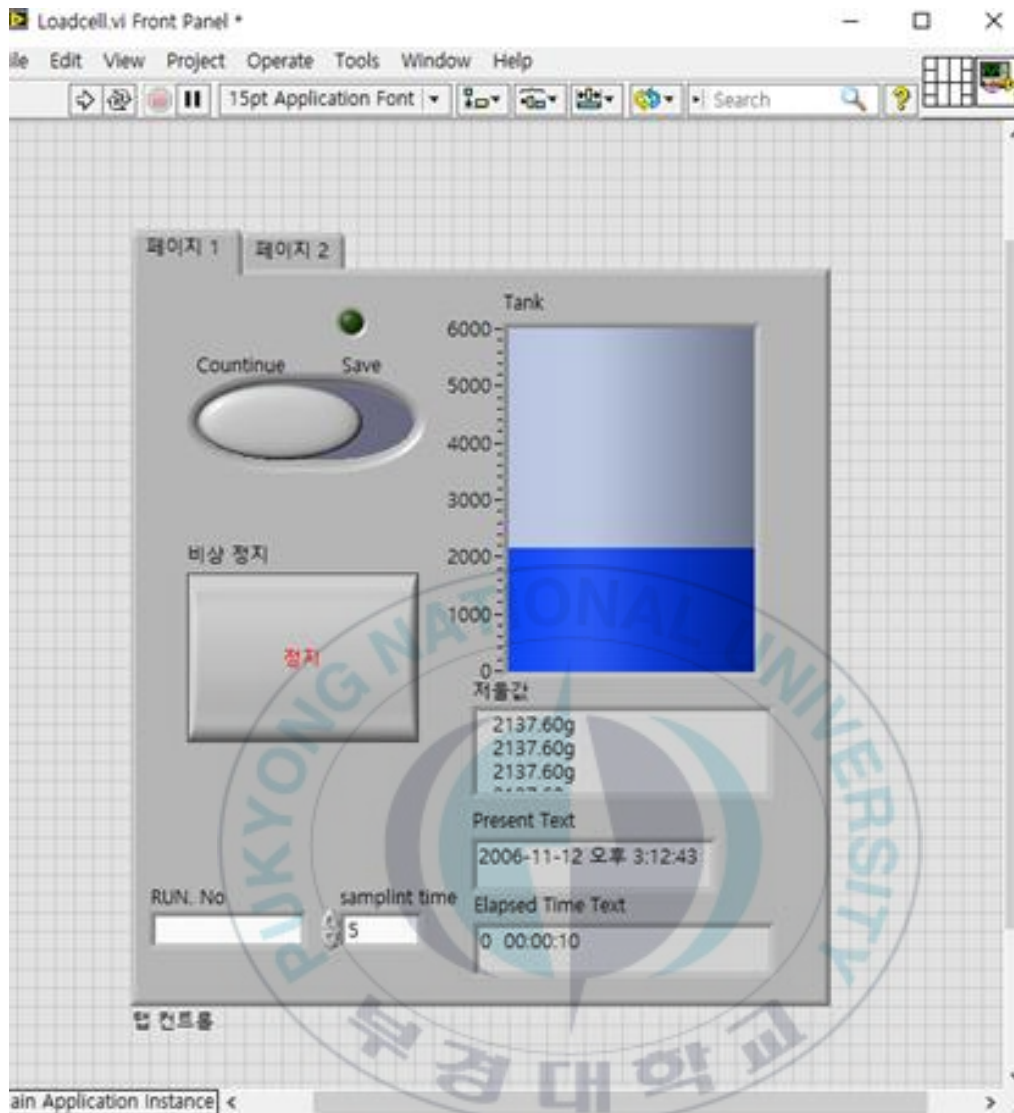


Fig. 2-4 Measurement of SFC with Labview

2.2 실험방법

2.2.1 실험계획법 및 요인배치법

D.O.E (Design of experiments 실험계획법)란 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 진행하고, 데이터를 어떠한 방법으로 취득하며, 통계적 방법으로 데이터를 분석하며, 최소의 실험 횟수에서 최대의 결과를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다¹³⁾. 따라서 실험 계획법을 사용한다는 것은 해결하고자 하는 문제의 인자를 선택한 이후에 다양한 실험방법 중 가장 적합한 실험방법을 선택하고, 실험 순서 및 실험 데이터에 대한 최적 분석 방법을 선택한다는 과정이다.

실험계획법을 적용할 때 크게 고려할 사항 중 하나는 저비용으로 실험을 수행하는 것이다. 따라서 실험계획법을 수립할 때 어떠한 방법을 적용하면 적은 실험횟수로 유용한 실험결과를 도출할 것인가는 중요한 문제로 지적된다. 하지만 저비용으로 수행된 실험결과의 신뢰성이 낮다면 이는 실험결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 되므로 저비용이면서도 효과적인 실험계획을 수립하여야 한다.¹⁴⁾ 실험계획법을 선택할 경우 기본원리에 의해 실험계획법을 선택해야하는데, 이는 실험의 정확성과 정밀성, 효율성이라는 원리를 기본으로 맞추어야 한다. 이러한 실험계획법의 기본원리는 랜덤화의 원리, 반복의 원리, 블록화의 원리, 교락의 원리, 직교화의 원리 총 5가지 기본원리가 있다. 랜덤화의 원리란 실험순서를 무작위로 결정하는 것을 랜덤화라고 한다. 이는 선택된 인자 외의 기타 원인들이 실험에 영향을 주는 것을 방지하기 위함이다. 반복의 원리는 인자(Factor)의 동일한 수준 내에서 실험을 최소 두 번 이상 수행하기 위한 원리이다. 이는 통제 불가능한 요인에 의해 실험결과가 매 시행마다 달라질 가능성이 높기 때문이고, 반복실험

험을 통해 실험 간의 오차 추정이 가능하기 때문이다. 이로 인해 관측된 인자의 효과가 통계적으로 유의미한지 판단해주기 위함이다.

블록화의 원리는 전체 실험에서 동일한 조건을 가진 여러 가지 경우들로 나눌 수 있는데 이것을 블록화의 원리라고 한다.

교락의 원리란 필요없는 2인자 교호작용이나, 고차의 교호작용을 블록과 교락시키는 방법을 말한다. 직교화의 원리는 요인간의 직교성을 갖도록 실험을 계획하여 데이터를 취득하면, 같은 실험 횟수라도 검출력이 더 좋은 검정을 할 수 있고, 정도가 더 높은 추정을 할 수 있다.

실험에 앞서 실험계획법을 적용하기 전에는 실험의 목적을 설정하고, 그 목적에 도달할 수 있는 반응치를 선택해야한다. 그리고 반응치에 영향을 미치는 인자와 인자수준을 선택하여 실험에 적합한 실험계획법을 선정해야 고효율성과 저비용의 분석을 이끌어 낼 수 있다¹⁵⁾.

실험계획법은 다양한 종류가 존재한다. 요인배치법(Factorial design), 분할법(Split plot design), 교락법(Confounding method), 일부 실시법(Fractional factorial design), 반응표면분석법(Response surface method), 다구찌 실험계획법(Taguchi experiment planning) 등이 존재한다.

요인배치법(Factorial design)이란, 인자의 각 수준 모든 조합에 대하여 실험을 행하는 것으로, 실험순서는 랜덤화의 원리를 사용한다. 인자가 하나인 경우엔 일원배치법(One way factorial design), 둘인 경우에는 이원 배치법(Two way factorial design), 세개 이상인 경우는 다원 배치법(Multi way factorial design) 이라고 부른다.

분할법(Split plot design)은 요인배치법에서 실험순서가 완전히 랜덤하게 정해지지 않고, 실험전체를 몇 단계로 나누어서 단계별로 랜덤화하는 실험 계획법을 분할법이라 한다. 실험에 취급되는 인자의 종류에 따라 완전 랜덤화가 극히 곤란한 경우가 있을 때 사용된다.

교락법(Confounding method)은 요인배치법의 실험에서 인자간의 모든 교호작용이 검출되지만, 고차의 교호작용은 구하지 않는 것이 좋다. 검출할 필요가 없는 교호작용을 다른요인과 교락하도록 배치하는 방법을 교락법이라 한다. 교락법은 실험횟수를 늘리지 않고도 전체 실험을 블록화 하여 간편하게 실험할 수 있는 장점이 있다.

일부 실시법(Fractional factorial design)은 불필요한 교호작용이나, 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하는 방법이다.

반응표면분석법(Response surface design)은 최적화 단계에서 사용되는 실험계획법이다. 중심합성계획법, 회전계획법, EVOP법, 심플렉스법 등이 반응표면분석법에 속한다.

다구찌 실험계획법(Taguchi experiment planning)은 교점에서의 최적화에 주로 사용되고 있으며, 중간 값에서의 최적화를 위해서 복잡한 연구가 이루어지기는 했지만 적용이 어려운 편이다.

본 연구에서는 부분요인배치법과 완전요인배치법 두 가지 실험계획법을 구성하였다¹⁶⁾.

완전요인배치법이란 k개의 인자인 독립변수들을 다루는 실험계획으로 모든 인자들의 수준 수가 X개일 때 사용되는 계획법이다. 완전요인배치법은 모든 수준조합을 선택하여, 실험을 설계하는 방법이다. 예를 들어 독립인자 수가 2개이고, 각 인자를 A, B로 표시하고 각 인자의 두 수준을 A_0, A_1 또 다른 인자의 두 수준을 B_0, B_1 으로 표시하면 가능한 수준조합은 다음과 같다.

$$A_0B_0, A_0B_1, A_1B_0, A_1B_1 \quad (2-1)$$

이는 2개의 수준을 가진 완전요인배치법의 가능한 수준 조합의 수는 2^k 가 된다. 두 수준을 0, 1로 표시하거나 물리 값으로 표시할 수 있지만, 실험계획에서 인자들은 -1에서 1까지의 값으로 표준화되어 사용된다. 이는 실제 물리 값을 그대로 사용할 경우 인자간의 영향도 차이를 한눈에 알기 힘들고, 일부 인자의 영향으로 회귀 방정식의 계수들이 지나치게 커지기 때문이다.¹⁷⁾

하지만 인자의 수 k 가 커짐에 따라 실험점의 수는 기하급수적으로 증가하게 되어 현실적으로 모든 실험점에서 실험을 하는 것이 불가능하게 된다. 예를 들어 인자의 수 k 가 5인 경우 2^5 인 경우 실험횟수는 32회가 된다. 하지만 인자의 수인 k 가 10이 되면 실험횟수는 2^{10} 인 1024회가 된다. 그리하여 완전요인배치법은 모든 조합에서 실험을 실시 할 수가 있어 신뢰성은 매우 높지만, 수준수가 늘어날수록 완전요인배치법을 적용하기엔 상당한 비용과 시간이 든다. 완전요인배치법을 적용하기 위해서는 일반적인 요인배치법 중에서 수준수가 가장 적은 경우이므로 많은 요인들이 있는 실험의 초기단계에서 특히 유용하다. 식 (2-1)는 2-수준 완전요인배치법을 나타내며 식 (2-2)는 2-수준 부분요인배치법을 적용한 실험횟수를 나타낸다.

$$n = 2^k \quad (2-2)$$

$$n = 2^{k-1} \quad (2-3)$$

식 (2-2)는 2-수준 완전요인배치법을 나타내며 식 (2-3)은 2-수준 부분요인배치법을 적용한 실험횟수를 나타낸다.

여기서 n 은 실험횟수를 나타내며, k 는 인자의 수이다.

2-수준 부분요인배치법은 인자의 수가 많은 경우 가능한 모든 인자의 수준조합을 모두 선택하지 않고 일부 수준조합만 선택하여 설계하는 방법이

부분요인배치법이다. 예를 들어 인자의 수인 k 가 3일 경우, 완전요인 배치법에서는 가능한 수준 조합의 수는 8개 된다. 하지만 부분요인배치법에서 부분요인배치법은 이러한 8개의 수준조합 중에서 1/2개인 4개만 선택하여 실험을 설계한다¹⁸⁾.

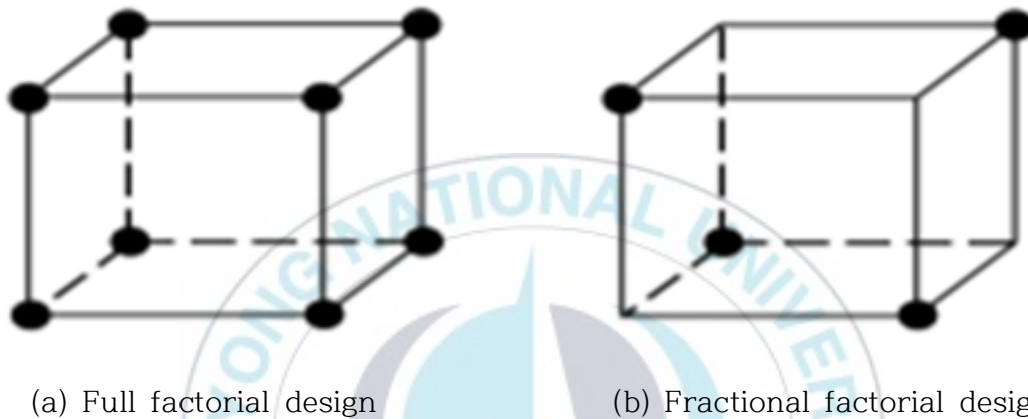


Fig. 2-5 Experiment point of full and fractional factorial design

Fig. 2-5는 완전요인배치법과 부분요인배치법에서 선택된 실험점을 보여주고 있다. 완전요인배치법은 부분요인배치법에 비해 두배 많은 설계 점을 보여주고 있다. 즉 부분요인배치법을 사용하는 경우 완전요인배치법의 실험점 8개 중 4개 에서만 계측된다. 그러나 실험횟수를 줄이게 되면 요인들과의 효과가 분리되지 않은 교락이 발생한다. 따라서 부분요인배치법은 필요한 반응값만 알 수 있는 실험단위의 블록을 형성하기 때문에 교호작용은 설계 내 다른 요인이나 블록에 대해 항상 교락 되어 질 수밖에 없다¹⁹⁾.

2.2.2 실험방법

본 연구에서는 디젤엔진 성능실험에 있어 실험 조건으로 기관회전수는 2000rpm으로 고정하였으며, 25%부하로 고정하였다. 저부하로 고정한 이유는 변수의 수준을 넓게 하였기 때문에 엔진에 부담을 적게 미치게 하기 위한 것이다. 모든 실험은 충분한 예열 후 진행되었다. 또한 실험조건의 변경이 있을 때에는 안정된 엔진상태가 될 수 있도록 약 5분 동안 계측값 변동을 모니터링해서 변화가 없을 경우 데이터 계측을 실시하였다. 연소실 압력은 100 cycle 동안 계측하여 저장하였고, 앙상블 평균을 나타내었다. 각종 온도는 엔진의 상태를 모니터링 할 수 있도록 지속적으로 계측하고 1초마다 3분 간 계측하여 컴퓨터에 저장하였다. 연료소비량은 5분 간 전자저울을 통해 소모된 중량을 계측하였다.

엔진 성능에 영향을 미치는 요인이며 제어가 가능한 5가지 요인으로 IT, PCR, PI, VGT, EGR을 설정하였고 반응치는 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 연료소비율(SFC)로 설정하였다. 이를 통해 5인자 2수준의 부분요인배치법과 완전요인배치법을 적용하여 유효성 검토를 진행하였다. Table 2-6에 각 인자의 수준을 나타내었다. 각 인자의 수준은 지난 실험에서보다는 좀 넓게 잡았다.

Table 2-7과 Table 2-8은 Minitab v16을 통하여 랜덤화를 실시한 실험순서에 대해서 나타내었다. 랜덤화를 선택한 이유는 실험계획법을 통한 실험이 검정성이 일괄성이 있을 경우에 실험결과에 대한 신뢰성이 정확히 판단하기 어렵기 때문에 실험순서는 랜덤화를 적용하였다. 특히 주위 온도 및 습도에 민감한 디젤엔진에서의 NOx를 측정하기 위해서는 반드시 필요한 절차이다. Table 2-7에는 부분요인배치법을 적용한 인자와 인자의 수준을 나타내었으며, Table 2-8은 완전요인배치법을 적용한 인자와 인자 수준을

나타내었다. 실제 물리 값을 사용하지 않고 -1과 1을 사용한 것은 영향도 차이를 한눈에 알기 쉽도록 하기 위해서다. 총 4번의 실험을 진행하였는데, Table 2-9에는 검토 인자 외 변수에 대한 검토를 위해 실시한 실험내용을 나타내었다. 1번 실험은 실험 수가 많기 때문에 서로 다른 날짜에 실험을 한 경우이고, 2번 실험은 같은 날짜에 한 실험이다. 3번 실험은 같은 날짜에 실험을 하였으나 연료소비율의 측정 방법을 다르게 실시한 경우로 앞서 설명한 것처럼 1, 2번 실험은 webcam을 이용하여 연료소모량을 측정하였고 3번 실험은 디지털 통신 케이블을 이용하여 측정하였다. 4번 실험은 디지털 방식으로 연료소비율을 측정한 3번 실험의 결과를 확인하기 위하여 동일한 조건으로 실험을 진행 하였다.

마지막으로 연료소비율에 영향을 미치는 전자저울에 영향을 미치는 외부인자에 대해 검토하기 위해 엔진 구동시 발생하는 냉각팬에 의한 바람과 진동의 영향을 파악하고자 다음과 같은 실험을 추가하였다. 실험조건은 Table 2-10에 나타내었다. 실험조건(1)은 진동패드와 바람막이를 모두 제거한 상태에서 엔진을 운전하였다. 실험조건(2)에서는 진동패드만 부착하였으며, 실험조건(3)은 바람막이만 부착하였다. 실험조건(4)는 진동패드와 바람막이 모두 부착한 상태에서 엔진을 구동하였다. Fig 2-6은 냉각팬에 의해 생성되는 바람의 효과를 상쇄시키기 위해 바람막이를 설치한 형상을 나타낸다. 바람막이는 전자저울 주변에 아크릴 판으로 설치를 하였으며, 이음새 부분을 씰링하여, 밀폐공간을 만들었다. 전자저울 하부에는 진동을 상쇄시키기 위하여 진동패드를 부착하였다. 엔진 구동은 부하는 무부하 상태에서 진행되었으며, 5분간 계측 후 5분간의 데이터 안정화를 거쳐 조건 별 두 번의 실험을 진행하였다.

Table 2-6 Level of factors on test (Fractional and Full factorial design)

Load		25	
Factor	Level	1	2
IT (° TDC)		1	12
Pcr (Mpa)		40	80
PI (ms)		0	2
EGR (%)		0	60
VGT (%)		0	60

Table 2-7 Fractional factorial design on test

Order	Code factor				
	PCR	IT	PI	EGR	VGT
1	1	-1	-1	1	1
2	1	1	-1	-1	1
3	-1	-1	1	-1	-1
4	-1	1	1	-1	1
5	1	-1	1	1	-1
6	-1	1	1	1	-1
7	1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	-1	-1	1
10	-1	1	1	1	-1
11	-1	-1	1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	1
13	1	-1	-1	-1	-1
14	-1	-1	1	1	1
15	1	1	-1	1	-1
16	-1	1	-1	-1	-1

Table 2-8 Full factorial design on test

Order	Code factor				
	PCR	IT	PI	EGR	VGT
1	-1	1	1	-1	1
2	1	1	-1	-1	-1
3	1	-1	1	1	1
4	-1	-1	-1	1	-1
5	1	1	-1	-1	1
6	-1	-1	-1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	-1	1	1	-1	-1
9	-1	1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	-1	1	1	1
12	1	-1	-1	-1	-1
13	-1	1	1	-1	-1
14	1	-1	-1	1	1
15	1	-1	1	1	-1
16	-1	-1	1	-1	1
17	-1	1	-1	-1	1
18	1	-1	1	-1	1
19	1	1	-1	1	1
20	1	1	-1	1	-1
21	-1	1	-1	-1	-1
22	1	-1	1	-1	-1
23	-1	-1	-1	-1	-1
24	-1	1	-1	1	1
25	-1	-1	1	1	-1
26	-1	1	1	1	1
27	1	-1	-1	-1	1
28	1	1	1	-1	-1
29	-1	-1	1	-1	-1
30	1	1	1	1	-1
31	1	1	1	-1	1
32	-1	-1	-1	-1	1

Table 2-9 Level of factors on tests by full and factional factorial design

Test Condition		1	2	3	4
Half	date	1	2	3	4
	fuel consumption	webcam	webcam	digital	digital
Full	date	1	2	3	4
	fuel consumption	webcam	webcam	digital	digital

Table 2-10 Experiment conditions

NO./ Condition	Vibration proof pad	Windshield
1	non-use	non-use
2	use	non-use
3	non-use	use
4	use	use

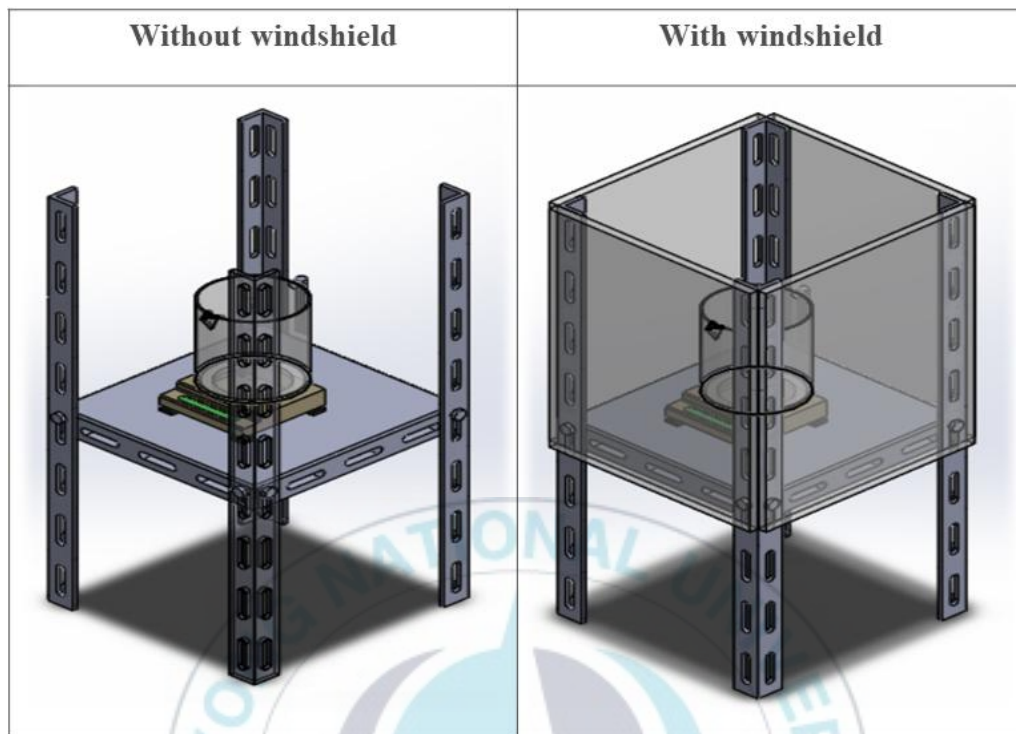


Fig. 2-6 Modeling with or without windshield and vibration proof pad

3. 결과 및 고찰

3.1 요인배치법 주효과도 결과 비교

Fig. 3-1은 5개 인자의 반응치인 질소산화물(NO_x)에 대한 주효과도를 나타내었다. 그래프의 X축은 각 인자 별 수준을 나타내며, Y축은 질소산화물의 발생량(g/kWh)을 나타낸다. 범례의 파란색 사각형은 실험 1을, 초록색 원형은 실험 2, 주황색 마름모는 실험 3, 검은색 삼각형은 실험 4를 나타낸다. 또, 점선은 부분요인배치법을, 실선은 완전요인배치법을 나타낸다. 먼저 인자별 영향을 살펴보면 IT와 Pcr이 큰 영향을 미치고 있는데 높은 수준으로 갈수록 질소산화물의 배출량이 커지고 있다. EGR의 경우도 큰 영향을 미치고 있는데 이는 반대로 높은 수준으로 갈수록 배출량이 작아지고 있다. 실험 1을 제외하면 부분 및 완전요인배치법에 따른 차이는 크게 나타나지 않고 변화폭도 크지 않게 나타나고 있다. 실험 조건인 대기조건에 따라 질소산화물의 발생량은 영향을 받고 있으나 경향은 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 요인배치법을 통해 정량적인 평가는 신뢰성에 문제가 생길 가능성이 있으나 정성적인 평가는 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 3-2는 일산화탄소(CO)에 대한 주효과도를 나타내었다. PI를 제외한 나머지 인자들은 일산화탄소의 배출량에 큰 영향을 미치지 않지만 PI를 실시한 경우에 일산화탄소가 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 질소산화물의 결과와 비교했을 때 일산화탄소의 경우가 좀 더 일관성이 없어 보인다. 그러나 경향은 질소산화물과 마찬가지로 볼 수 있다. 따라서 요인배치법을 통해 정량적인 평가는 신뢰성에 문제가 생길 가능성이 있으나 정성적인 평가는 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 3-3에는 5가지 요인에 따라 연료소비율에 대한 주효과도를 나타내었다. 연료소비율의 경우 인자에 따른 연료소비율의 변화를 확인하기 어려울

정도로 형태가 다르게 나타났다. 질소산화물과 일산화탄소의 경우와 달리 같은 경향을 나타내지 못하고 있다. 따라서 연료소비율의 경우 요인배치법을 통해 최적화에 활용하는 것에는 좀 더 세밀한 검토가 필요할 것으로 보인다.



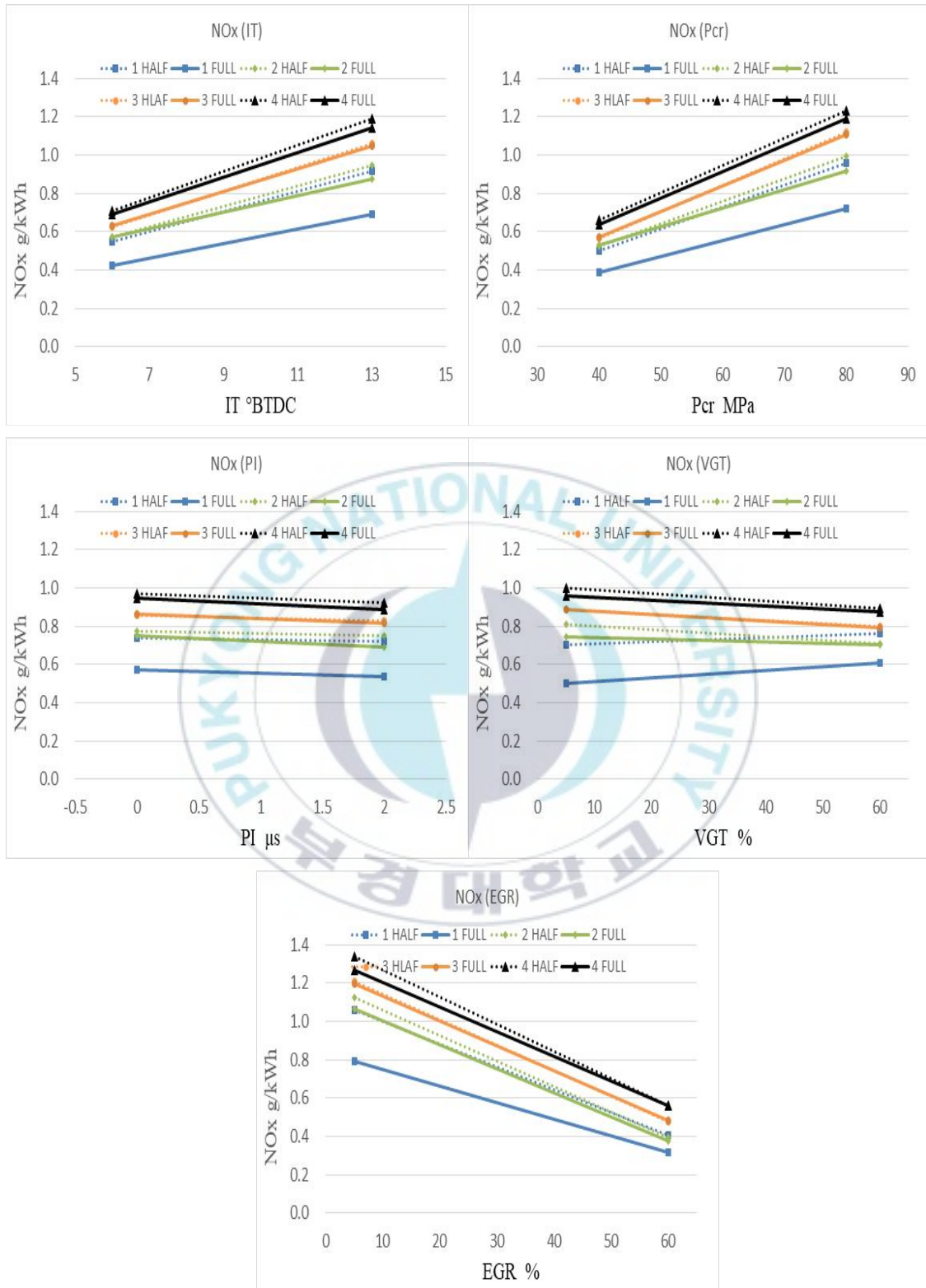


Fig. 3-1 Main effects plot for nitrogen oxide

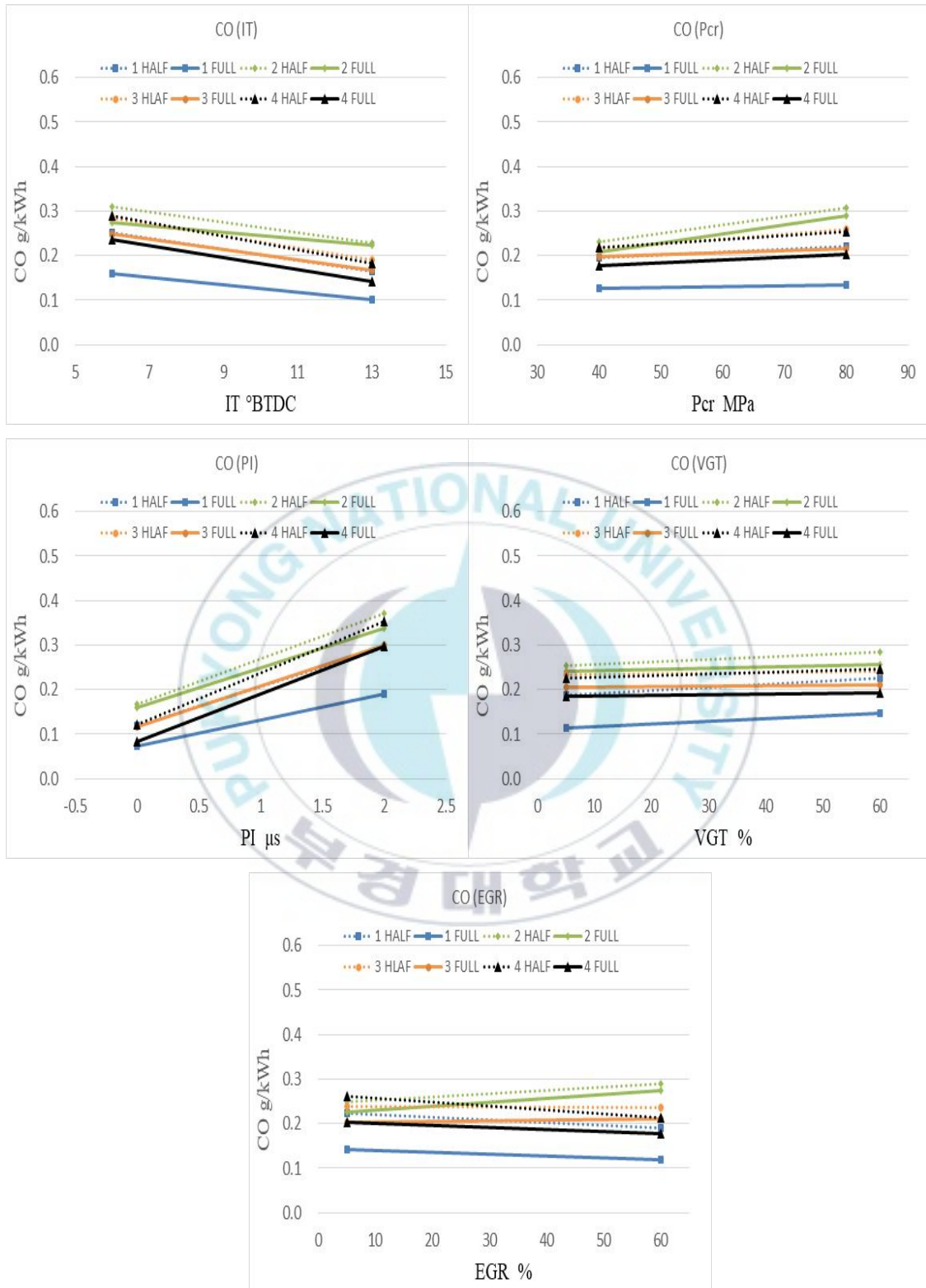


Fig. 3-2 Main effects plot for carbon monoxide

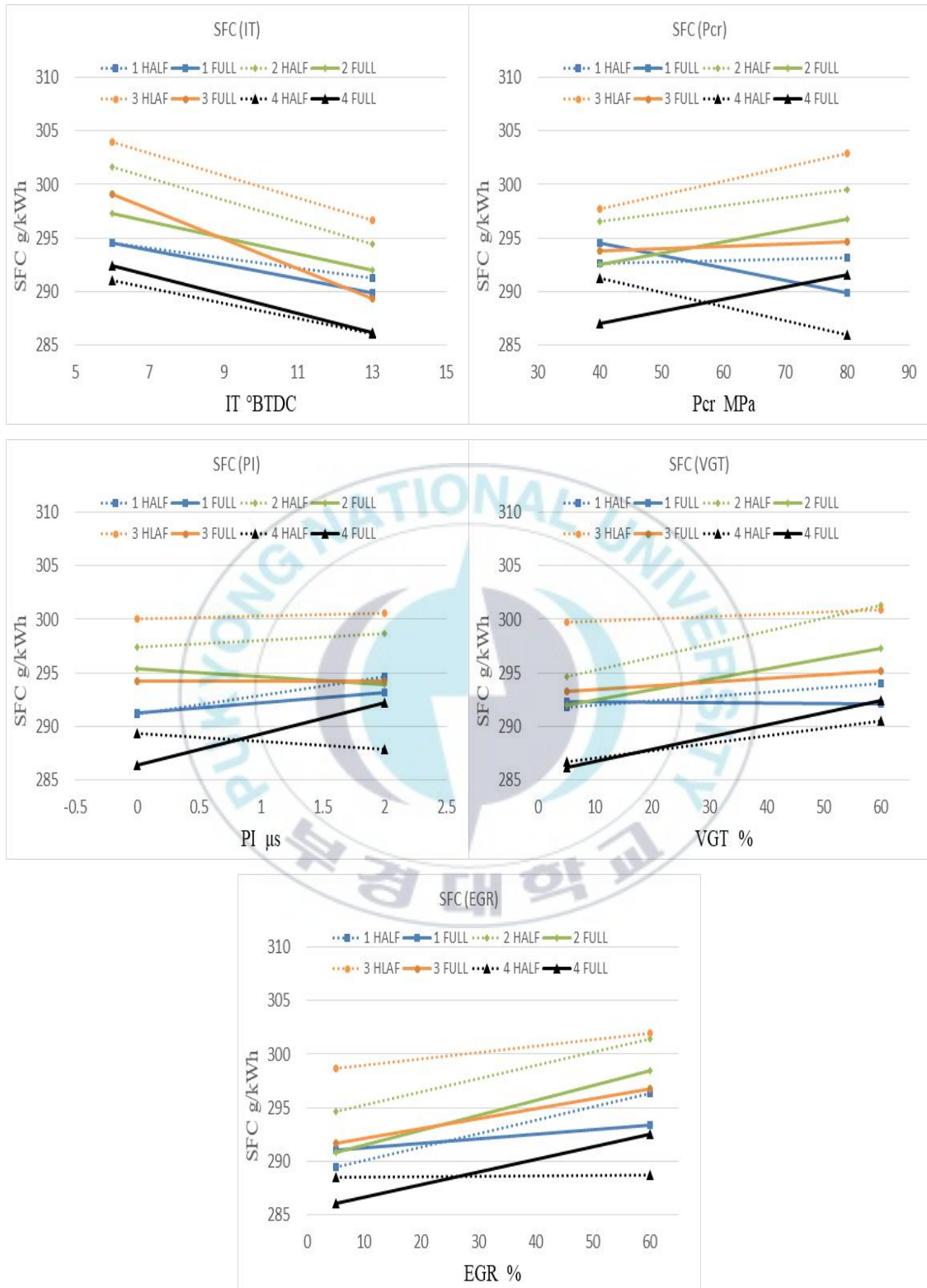
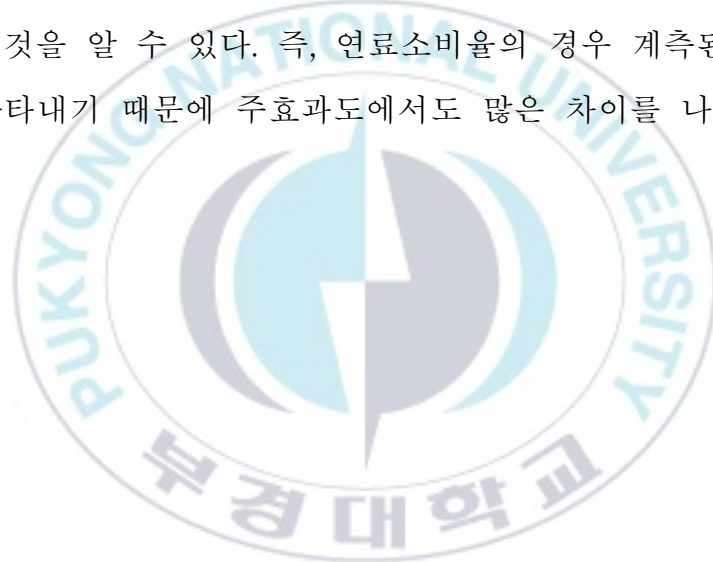


Fig. 3-3 Main effects plot for specific of fuel consumption

앞서 주효과의 결과에서 연료소비율의 경우 그 값의 차이가 크기 때문에 그 원인을 확인하고자 하였다. Fig. 3-4에서 Fig. 3-7까지는 실험 조건 별 부분요인배치법과 완전요인배치법에 대한 실험순서에 따른 반응치의 결과를 나타내었다. 파랑색 원형은 완전요인배치법을 빨간색 사각형은 부분요인배치법을 나타내며 완전요인배치법은 32개의 데이터이고 부분요인배치법은 16개의 데이터를 가진다. Fig. 4에서 Fig. 7까지 검토해 보면 앞선 주효과도의 결과에서 알 수 있듯이 질소산화물과 일산화탄소의 경우 완전 및 부분요인배치법에 따라 큰 차이가 없지만, 연료소비율의 경우는 많은 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 연료소비율의 경우 계측된 데이터가 많은 차이를 나타내기 때문에 주효과도에서도 많은 차이를 나타내는 것으로 사료된다.



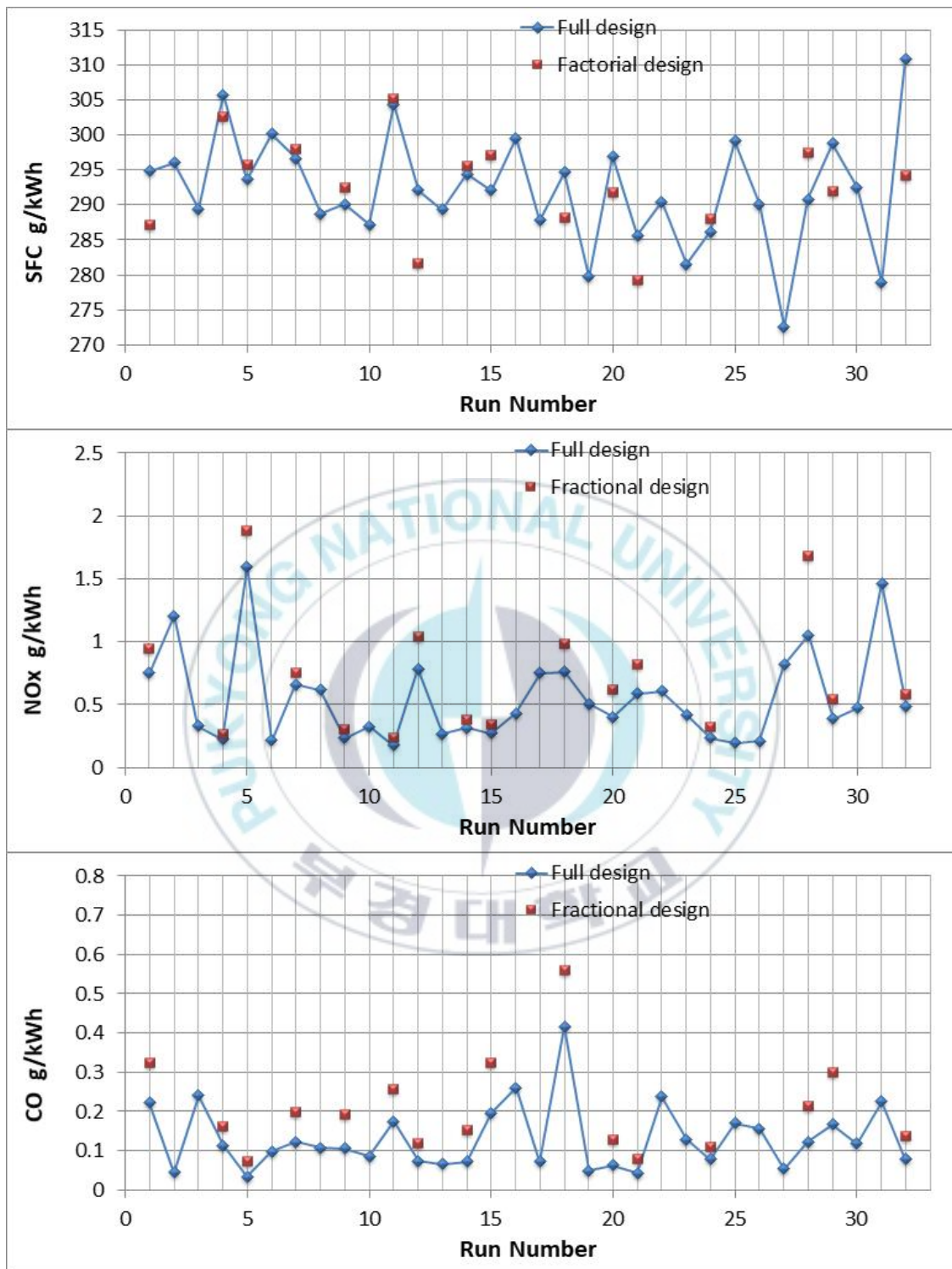


Fig. 3-4 Comparison of Result of first examination between full and fractional factorial design

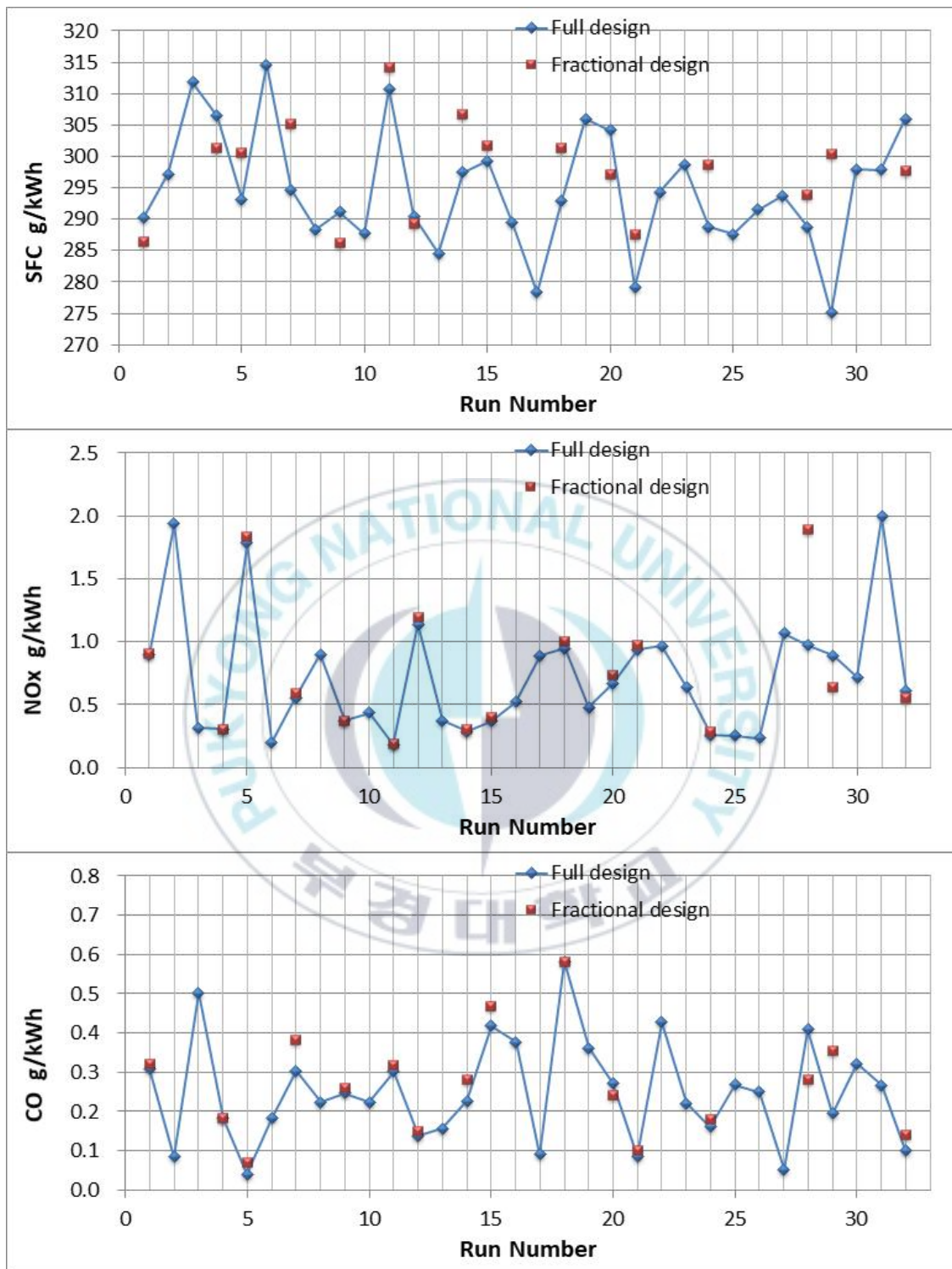


Fig. 3-5 Comparison of Result of second examination between full and fractional factorial design

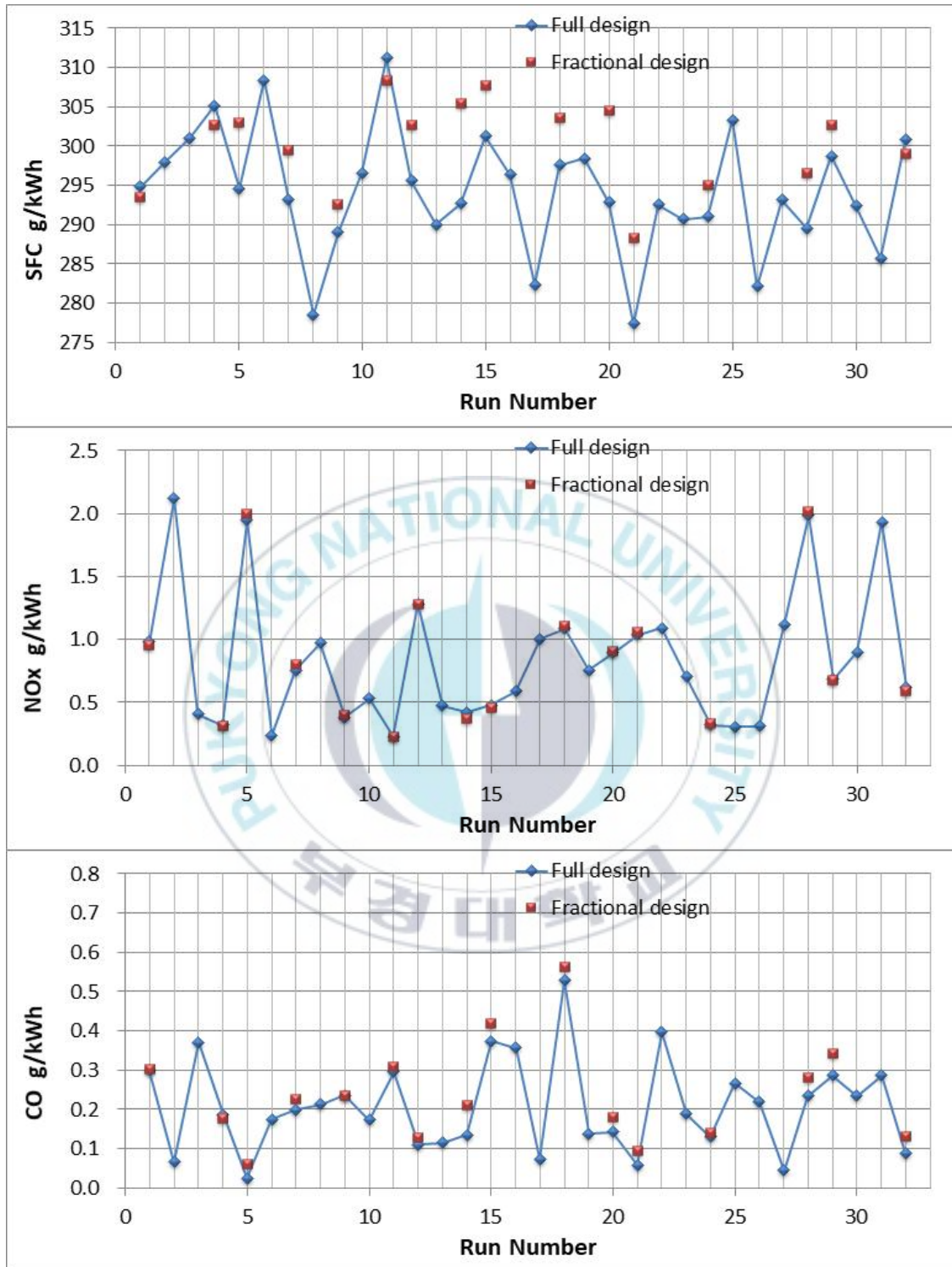


Fig. 3-6 Comparison of Result of third examination between full and fractional factorial design

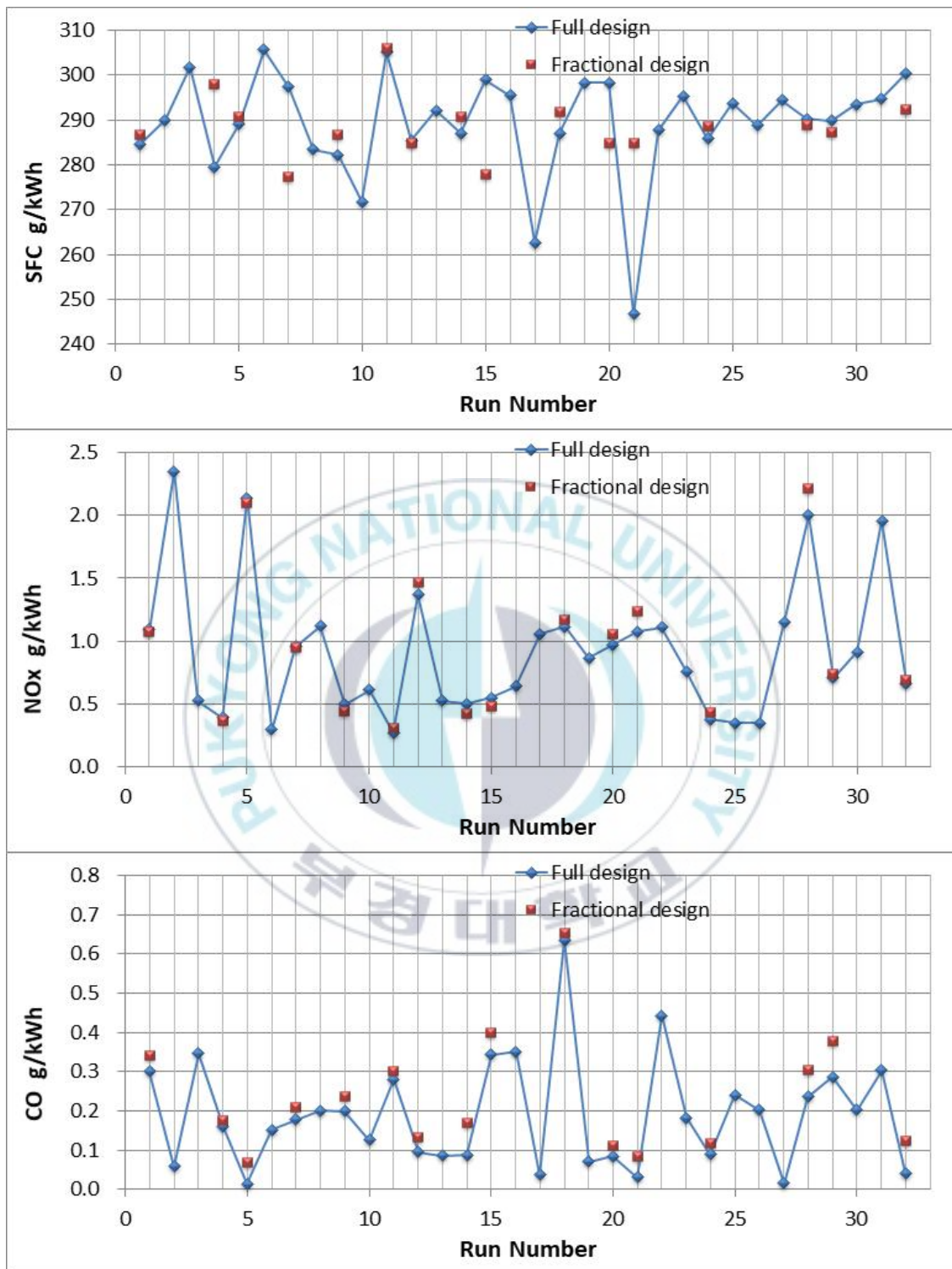


Fig. 3-6 Comparison of Result of forth examination between full and fractional factorial design

3.2 연료소비량 측정에 있어 영향을 미치는 외부요인 파악

주효과도에서 연료소비율의 경우 결과값이 많은 차이를 나타내며 일정한 경향을 찾아내기 어렵기 때문에 연료소비량의 측정에 있어 엔진구동에 따라 발생하는 팬의 의한 바람과 진동의 영향이 없는지 파악하기 위하여 바람막이와 진동패드를 장착한 실험을 실시하였다. Fig. 3-7에서 Fig. 3-10까지 바람막이와 진동패드 유무에 따른 실험 결과값을 나타내었다. 파랑색 선은 5분간의 연료소모량을 나타내며, 주황색 선은 0.2초당 얻은 데이터에서 앞뒤의 차를 나타내었다. Fig. 3-7은 진동패드와 바람막이를 제외한 결과값을 나타낸다. 실험 조건(1)인 진동패드와 바람막이를 제거하고 실험을 진행하였다. 0.2초당 취득한 데이터의 차의 그래프는 일정하지 않고, 데이터가 튀는 것을 볼 수 있다. 이는 바람과 진동에 영향을 받는다고 판단하여 실험조건(2)에 대한 실험을 시작하였다.

실험조건(2)는 바람막이를 제외하고, 진동패드를 전자저울 하부에 설치하여 전자저울에 미치는 진동에 영향을 파악하고자 하였다. 진동패드를 설치함에도 불구하고 데이터 차를 나타내는 그래프는 불안정한 그래프를 나타내었다. 전자저울을 사용하여 연료소모량 계측에 있어 엔진 구동 시 발생하는 진동에 의한 영향은 미비하다고 판단된다. 그리하여 시험조건(3)에 대한 실험을 진행하였다. 실험조건(3)은 설치된 진동패드를 제거하고 바람막이만 전자저울 주변에 설치하여 실험을 진행하였다.

데이터 차를 나타내는 그래프는 앞서 실시한 실험조건(1)과 (2)보다는 현저히 줄어든 것으로 판단되나 그 양은 미비하다고 판단된다.

이후 실험조건(4)에 대한 실험을 진행하였다. 실험조건(4)는 진동패드와 바람막이 모두 설치하였다. 바람막이와 진동패드를 설치하지 않은 조건(1)과 바람막이와 진동패드를 설치한 조건(4)에 대한 연료소모량을 비교한 결과

0.79g이 차이가 발생하였다. 하지만 연료소비율(SFC)의 결과값이 주효과도에서 상당한 차이를 보이는 결과와 달리, 연료소모량 계측에 있어 외부 요인이 전자저울에 미치는 영향은 미비하다고 판단된다.



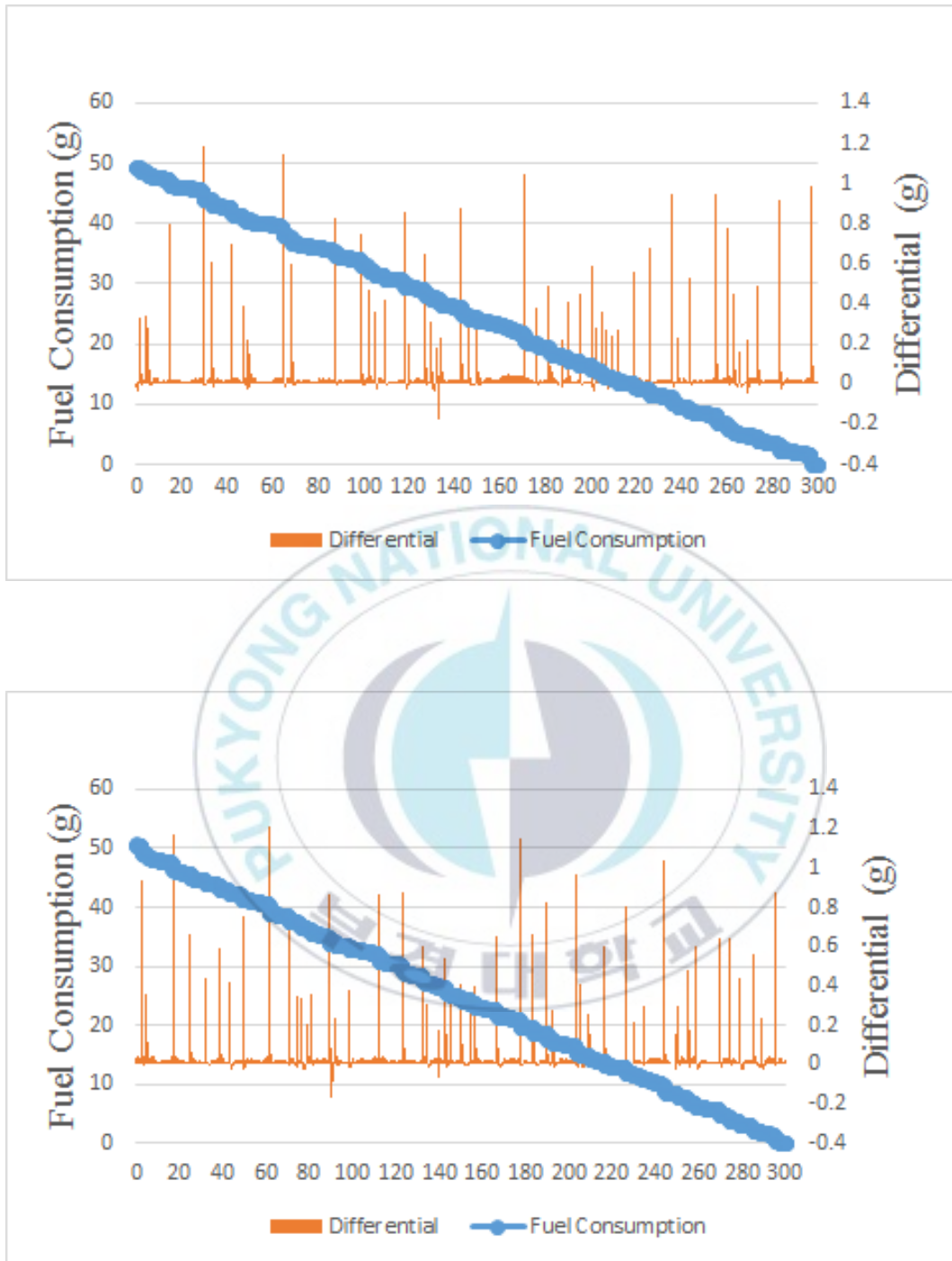


Fig. 3-7 Result of fuel consumption on condition 1

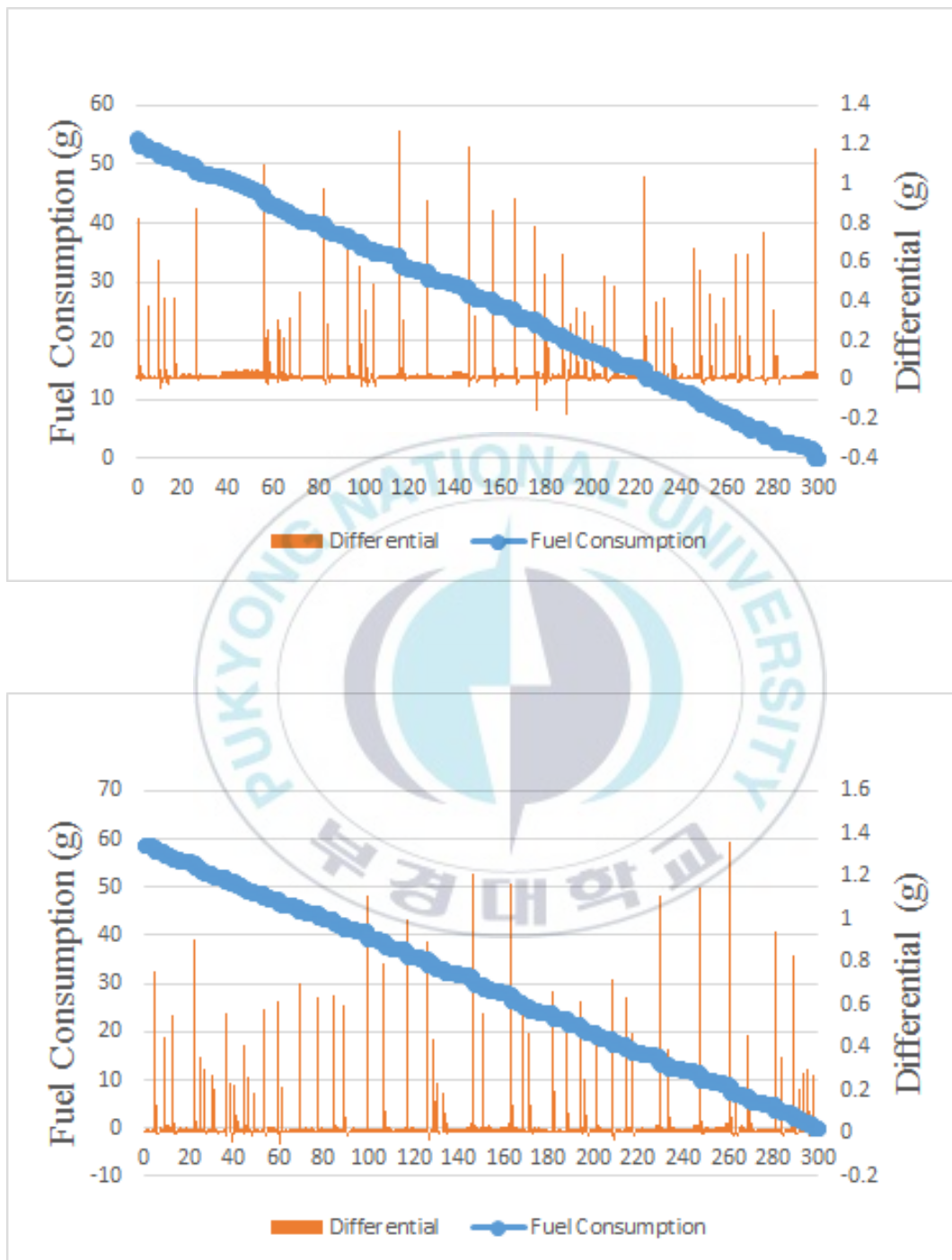


Fig. 3-8 Result of fuel consumption on condition 2

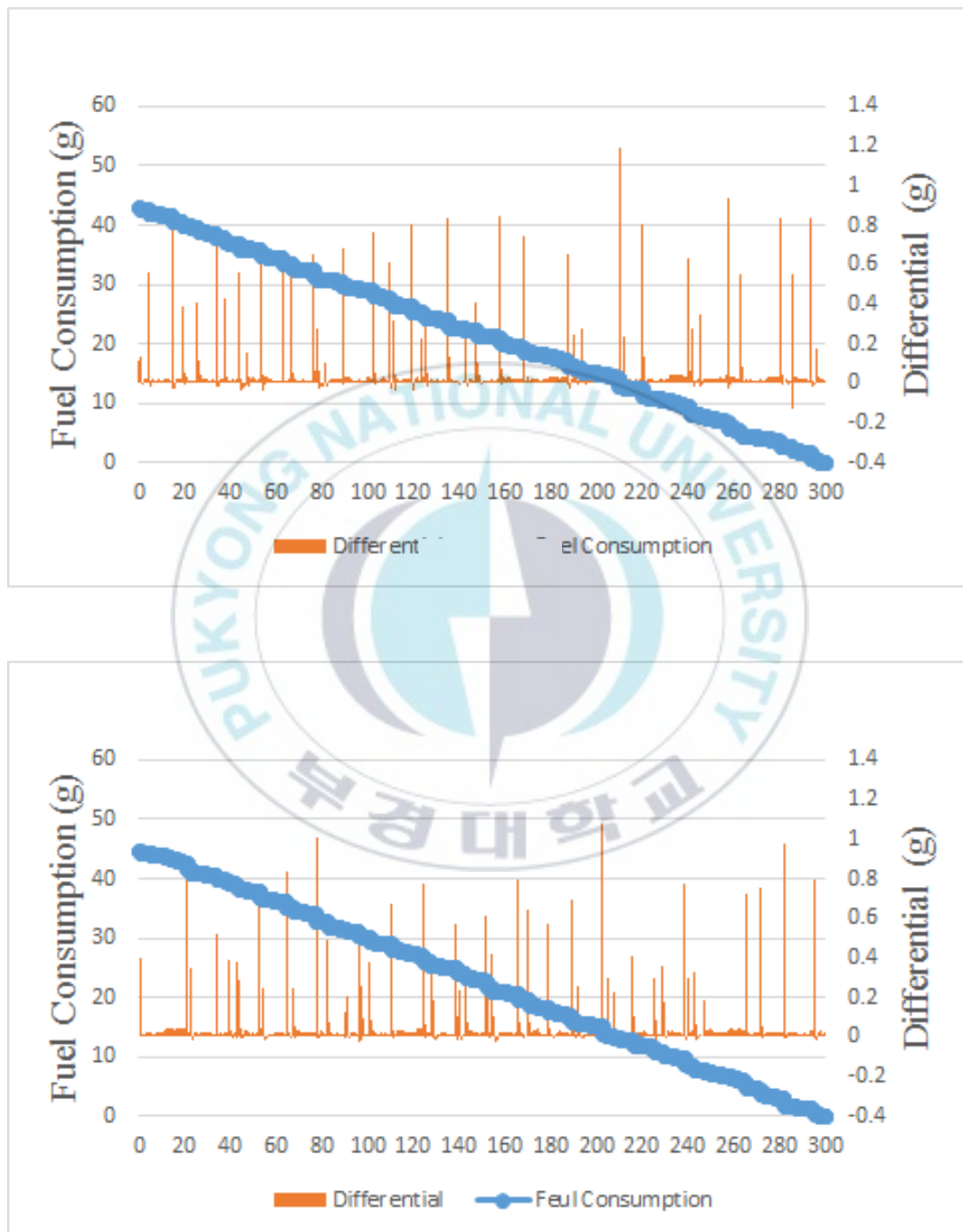


Fig. 3-9 Result of fuel consumption on condition 3

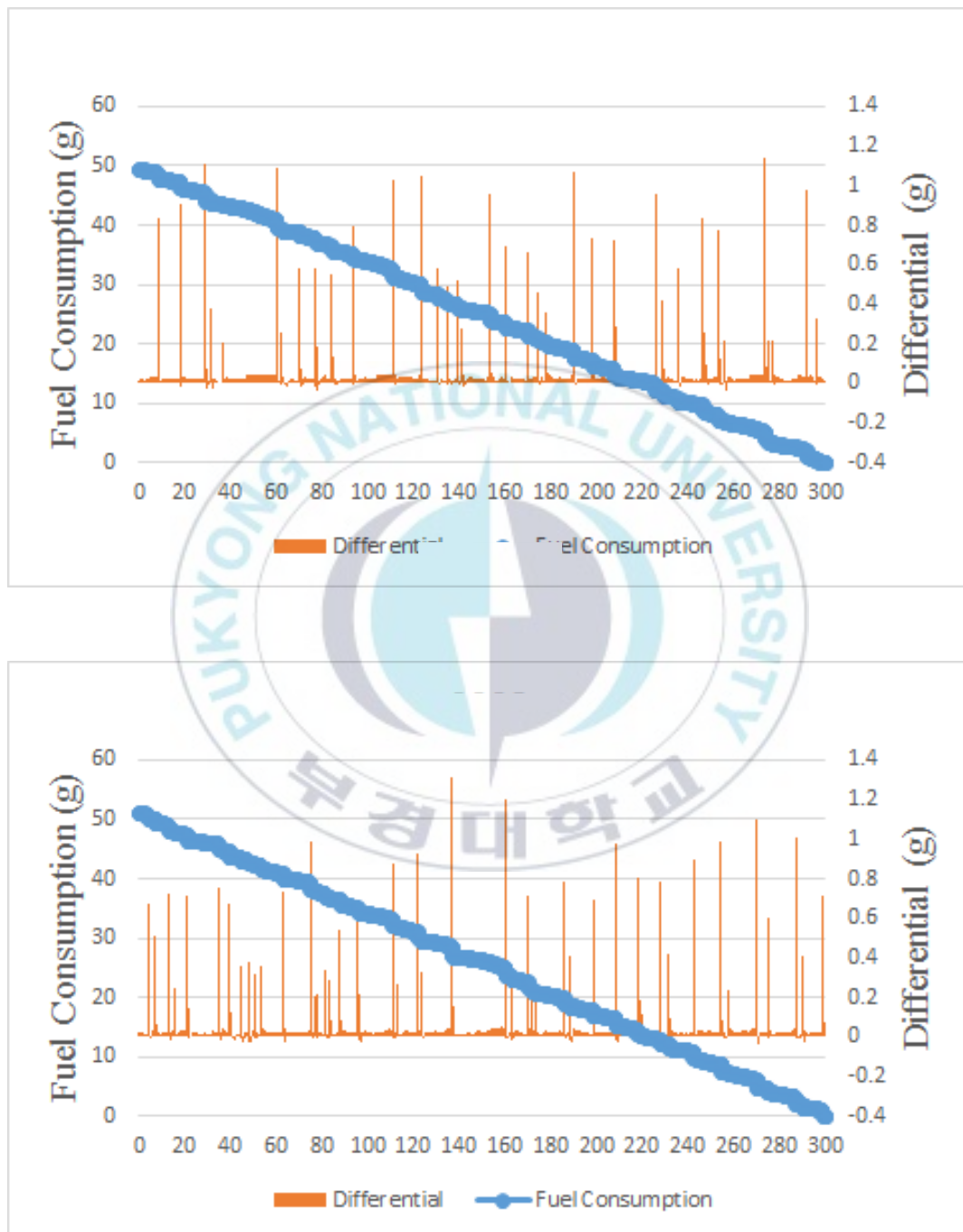


Fig. 3-10 Result of fuel consumption on condition 4

4. 결론

전자제어 디젤엔진의 성능실험에 있어 요인배치법을 적용하였을 때 그 유효성 검토에 대한 결과는 다음과 같다.

1) 디젤엔진 성능실험에 있어 적용한 실험계획법인 부분요인배치법과 완전요인배치법에 대한 주효과도를 분석하였다. 그 결과 질소산화물(NO_x)과 일산화탄소(CO)에 대한 주효과도는 어느 정도 정량적 및 정성적인 평가가 가능하였으나, 연료소비율(SFC)은 정량적 및 정성적인 평가가 어려운 것으로 검토되었다.

2) 이는 연료소비율의 측정값 자체가 실험 조건에 따라 큰 차이를 나타내는 것이 요인으로 판단된다.

3) 엔진 구동 시 발생하는 냉각팬에 의한 외부 바람과 엔진 구동 시 발생하는 진동에 의한 영향이 전자저울 측정에 있는지에 대한 실험을 실시하였고 그 결과 바람막이와 진동패드를 부착하지 않았을 때와 부착했을 때의 연료소비량 차이는 0.79g 이 발생하였다. 이는 주효과도에서 나타난 오차에 비해 현저히 적기 때문에 연료소비율에 미친 영향이 없다고 볼 수 있었다.

4) 연료소비량 측정에 있어 전자저울에 영향을 미치는 외부요인은 미비하다고 판단되었다. 디젤엔진 성능실험에 있어 요인배치법을 적용에 대한 결과는 반응치인 Emission은 부분요인배치법에 대한 유효성이 검증되었으나, 연료소비율(SFC) 측정에 있어 부분요인배치법 적용에 대한 유효성이 타당

하지 않다고 판단된다. 따라서 추후 디젤엔진 성능 실험에 있어 정밀한 연료소비량 측정이 가능하도록 시스템을 구축한 후에 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.



참고 문헌

- 1) 한국자동차산업협회, 2016, 한국 자동차산업에 간접적으로 관련된 종사자 수, <http://www.kama.or.kr/MainController>
- 2) e-나라지표, 2016, 자동차 등록 현황,
http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1257
- 3) 이성우, 2015, EURO 6가 국내 자동차산업에 미치는 영향에 대한 연구, 목포대학교 학위논문(석사),
- 4) W. Kwon, 2004, "Optimization of Common Rail HSDI Diesel Engine Applied Design of Experiment", MS thesis, Seoul univeristy, Seoul, Korea
- 5) 커먼레일 연료 분사
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2763993&cid=50307&categoryId=50307>
- 6) D. W. Kim, S. W. Lee and J. S. Lim, 2014, "A Study of GDI+MPI Engine Operation Strategy Focusing on Fuel Economy and Full Load Performance using DOE", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 3, pp. 42-49
- 7) <http://www.asiatoday.co.kr/view.php?key=20170731010015230>
- 8) 장현준, 2017, Diesel-CNG 혼소엔진에서 혼소율과 발열량에 따른 연소 및 배출가스 특성 연구
- 9) 이현준, 2015, 커먼레일 디젤엔진의 DPF와 LNT 재생 중 질소산화물 및 입자상 물질 생성 억제 제어에 관한 연구

- 10) S. C. Hwang, H. J. Kimm and S. H. Jung, 2017, "Optimization of Blending Oil With Non-Esterified Biodiesel Fuel Using Design of Experiment At Partial Engine Loads", International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 79-84
- 11) S. D. Lee, D. K. Koh and S. H. Jung, 2013, "Combustion Characteristic of Non-esterified Biodiesel Oil at Lower Common Rail Pressure", KSPSE, Vol. 17, No. 6, pp. 11-17
- 12) 김희중, 2015, 비에스테르화 바이오디젤 5% 혼합유의 성능최적화를 위한 실험계획법 적용에 관한 연구
- 13) 실험계획법
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1119589&cid=40942&categoryId=31819>
- 14) 권오성, 2002, 식스 시그마에서 실험계획법의 효과적 적용에 관한 연구
- 15) Design of Experiments Planning
<http://www.whatissixsigma.net/design-of-experiments-planning/>
- 16) 김희철, 2012, 현대 실험계획법, 남서울대학교 출판국
- 17) H. J. Kim et. al., 2016, "A study on the application of DOE for optimization of blending oil with non-esterified biodiesel fuel at partial engine load", KSPSE, Vol. 20, No. 2, pp. 51-57
- 18) 최정인, 2012, 2-수준 요인배치법에서 계량인자들의 곡선효과 검증을 위한 축차적인 추가실험설계
- 19) 요인배치법
<http://blog.naver.com/lchry/220556665893>

감사의 글

대학원 입학 당시 남들보다 늦은 나이에 대학원 생활을 시작하여 걱정이 많았지만, 어느덧 2년이라는 시간이 흘러 졸업을 앞두고 있습니다. 대학원 생활을 하면서 많은 분들께 도움을 받아 이렇게 감사의 글을 올립니다. 먼저 많이 부족한 저를 내연기관 실험실 부원으로 받아주시고, 열정적으로 지도해주신 정석호 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 석사기간 동안 연구에 매진 할 수 있도록 실험장비 운전부터 논문 지도까지 연구실에 남아 직접 지도해주시고 아낌없이 격려해주신 정석호 교수님께 진심으로 존경과 감사의 마음을 올립니다. 더불어 인생에 대한 조언과 경험담을 들려주신 고대권 교수님, 그리고 대학원 수업 당시 열정적으로 수업을 진행해 주시며 아낌없는 격려를 주신 모든 학과 교수님들께 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 대학원 입학 당시 거리낌 없이 다가와준 내연기관 실험실 부원들에게 큰 감사의 말씀을 드립니다. 대학원 생활에서 큰 힘이 되어준 유일한 친구 치욱이와 실험실에서 묵묵히 도움을 주던 예훈이 그리고 분위기 메이커인 상원이와 타지에서 생활한다고 많이 힘들지만 옆에서 연구 및 실험실 업무를 도와준 대학원생 Xufengren에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 대학원 생활에 활력소와 같은 저의 정신적 지주인 경주형과 퍽퍽 되지만 항상 많은 도움을 주는 여왕님 혜진이 그리고 타지에서 고생하시는 우리 큰형님 승훈이형님께 감사의 말씀을 전합니다. 더불어 대학원 생활 동안 타 실험실 이지만 많은 담소를 나누며, 힘을 주던 창우형님과 실험실 동생인들 우영이, 은호, 보현이, 현준이, 항준이, 동훈이, 태완이에게 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 저의 편입 동기인 영진이, 봉규, 규현이, 현정이 형에게 멀리서나마 고맙다는 말을 올립니다.

그리고 항상 묵묵히 지켜봐주시고 저에게 큰 힘이 되어 주신 아버지와 하늘에서 늘 응원하시며 지켜봐주시는 어머니, 친구 같은 동생 희종이 그리고 새로운 가족이 되어 저희 가족을 위해 큰 힘이 되어주시는 새어머니께 저의 긴 학생시절에 결실인 이 논문을 바칩니다.

모든 분들의 격려와 도움이 있었기에 무사히 졸업논문을 마칠 수 있었습니다. 이러한 분들의 은혜에 보답할 수 있도록 앞으로 더욱 노력하는 사회인이 되어 보답하도록 하겠습니다. 감사합니다.

2018. 1월

김 민 종

