

# 커먼레일압력과 천연가스 질량비율에 따른 이중연료 디젤엔진의 유해 배기배출물 특성

## Emission Characteristics of Dual Fuel Diesel Engine in Accordance with Common-rail Pressure and Natural Gas Mass Proportion

김경현\* · 정석호\*\*†  
Kyong-Hyon Kim\* and Suk-Ho Jung\*\*†

(Received 20 March 2020, Revision received 17 June 2020, Accepted 17 June 2020)

**Abstract :** There are many studies on multi-fuel diesel engine, and the most prominent among these are natural gas dual fuel diesel engines. The purpose of this study is to investigate the effect of common rail pressure and natural gas mass fraction on the emission of natural gas dual fuel diesel engines. Experiments were performed with differential common rail pressures and natural gas mass fractions at three loads, and engine revolutions were fixed at 2,000 RPM. As a result, the specific emission of NOx increased and CO and THC decreased as the common rail pressure increased; however, CO<sub>2</sub> did not change. There was no effect of the natural gas mass ratio on the trend of specific emission of NOx and CO. In the case of THC, it increased as the natural gas mass ratio increased at the lower output. In the case of CO<sub>2</sub>, the reduction rate was about 45%, and it decreased by about 4% per 12 kW output as the natural gas mass ratio increased.

**Key Words :** Emission, Dual fuel, Diesel engine, Common-rail pressure, Natural gas mass proportion

### 1. 서 론

국제적으로 대기오염과 지구 온난화를 대비한 규제가 점점 엄격해져 가고 있다. 우리나라의 경우 2015년부터 상용차를 시작으로 EURO VI를 도입하였다. 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 입자상물질(PM) 등이 더 많이 배출되는 단점이 있어 이를 보완해야

할 필요가 있다. 또한 EU에서는 지구온난화의 주범인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 저감을 승용차에도 2020년부터 시행하도록 하고 있어 CO<sub>2</sub>의 저감도 매우 중요한 연구 주제가 될 전망이다. 이러한 환경규제에 대비하여 디젤엔진에 대한 연구는 연료의 다양화를 추구하고 있다. 예를 들면 CO<sub>2</sub>의 저감을 위해 바이오 디젤유에 관한 연구<sup>1-3)</sup>와 바이오 에탄올에 대한 연구<sup>4)</sup>가 있다. 또한 NOx의 저감을

\*\*† 정석호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) : 부교수, 부경대학교 기계시스템공학과  
E-mail : suhojung@pknu.ac.kr , Tel : 051-629-6198  
\*김경현(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2962-2984) : 선박 감독관, 부경대학교 선박실습센터

\*\*† Suk-Ho Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) : Associate professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.  
\*Kyong-Hyon Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2962-2984) : Ship supervisor, Training ship management center, Pukyong National University.

위한 예멀전 연료<sup>5)</sup>에 대한 연구와 천연가스 이중 연료<sup>6-9)</sup>에 대한 연구들이 있다. T. Korakianitis 등은 SI와 CI 엔진에서의 성능에 대한 연구<sup>6)</sup>를 진행하였고, 디젤엔진에 CNG 혼소율 변화<sup>7)</sup>, 압축비 변화<sup>8)</sup>, 혼합율 변화<sup>9)</sup>가 성능에 미치는 영향을 밝혔다.

그러나 여전히 천연가스 이중연료 디젤엔진을 상용화하기 위해서는 천연 가스의 질량비율, 파일럿 분사 압력 및 분사 시기, 가변 용량 터보 차저 (VGT), 배기가스재순환(EGR) 등과 같은 다양한 요인에 따른 최대 토크와 출력뿐만 아니라 안전성을 테스트해야 한다. 본 연구에서는 2,000 cc 4기통 디젤 엔진에서 디젤 연료의 파일럿 분사 압력, 즉 커먼레일압력과 천연 가스의 질량비율이 에미션 특성에 미치는 영향에 대해 조사했다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 계통도는 Fig. 1에 나타내었다. 엔진은 (주)현대자동차에서 제작한 D4EA 4기통 전자제어 디젤엔진은 Table 1과 같다. 디젤엔진의 제어는 Woodward사의 MotoHawk Control Solution을 사용하였고 천연가스의 분사는

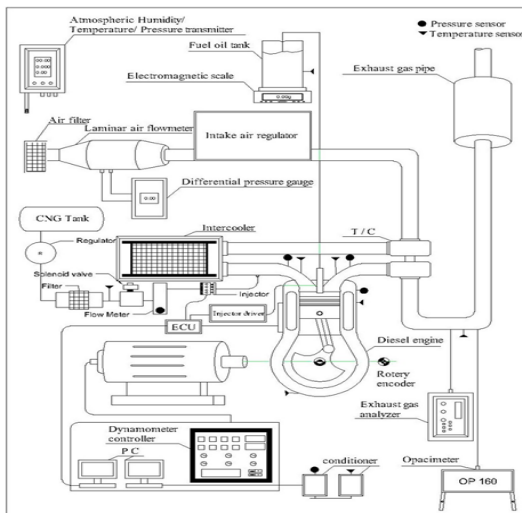


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Bore/Stroke	83/130 mm
Number of cylinders	4
Piston displacement	1,991 cc
Maximum power	84/4,000 kW/rpm
Compression ratio	17.7
Inlet valve opening timing	7°CA
Inlet valve closing timing	43°CA
Exhaust valve opening timing	52°CA
Exhaust valve closing timing	6°CA

Motec의 M800을 이용하여 PC에서 실시간 제어가 가능하도록 구성하였다. 배기가스의 성분측정은 Eutotron사의 MK-9000 모델을 사용하여 일산화탄소(CO), CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 토탈미연탄화수소(THC)의 농도를 1초마다 3분 동안 계측하여 PC에 저장하였다. 경유의 연료소비량 측정은 CAS사의 전자저울인 CUW-6200 모델을 사용하여 5분간 측정하였고, 천연가스는 유리관으로 만든 면적식 유량계를 이용하여 측정하였다. 흡기유량의 측정은 SOKKEN사의 층류유량계인 LFE-100B와 Furness Controls사의 차압트랜스미터 FC0332를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 2,000 rpm에서 수행되었으며, 엔진 부하는 11.7 kW, 23.4 kW 및 35.0 kW이다. 디젤 연료의 파일럿 분사시기는 13°BTDC로 설정하였고, 각 출력에서의 커먼레일압력은 50 MPa에서 80 MPa까지 10 MPa씩 증가시켰고, 천연가스 질량비율은 Table 2에 나타낸 것과 같이 설정되었다. 조건을 변경하였을 경우에는 약 5분간 안정기를 거친 후 실험을 실시하였고 각종 엔진의 온도를 계측하여 운전의 안정 여부를 판단하였다.

에미션의 배출율을 질량단위로 환산하기 위해서

Table 2 Experimental conditions

Output kW	Pcr MPa	NG %wt
11.7	50~70	0~77
23.4	50~80	0~87
35.1	60~80	0~85

Table 3 Coefficients of each emission<sup>10)</sup>

Emission	$u_{gas}$
NOx	0.001589
CO	0.000966
THC	0.000479
CO <sub>2</sub>	0.001517

NOx Technical code에서 제시된 방법<sup>10)</sup>을 사용하였다. 에미션 질량유량( $Q_{mgas}$ )은 계측된 배기기가스 질량에 각각의 성분의 농도와 밀도비를 곱하여 환산하였으며 식 (1)과 같다.

$$Q_{mgas} = Q_{meh} \times C_{gas} \times u_{gas} \quad (1)$$

여기서,  $Q_{meh}$ 는 배기가스 질량유량(kg/h),  $C_{gas}$ 는 각 에미션의 계측 농도(ppm)이며,  $u_{gas}$ 는 표준상태에서의 에미션의 밀도와 배기가스 밀도의 비를 나타내는 계수로 Table 3과 같다.  $Q_{mgas}$ 의 단위는 g/h로 여기에 출력을 나누어 배출율(g/kWh)을 계산하였다.

### 3.1 커먼레일압력의 영향

커먼레일압력을 50 MPa부터 10 MPa씩 변화시키면서 11.7, 23.4 및 35.1 kW의 부하별로 천연가스의 질량비를 바꿔가며 실험한 전체 결과를 가지고 커먼레일압력의 영향을 살펴보았다.

Fig. 2는 커먼레일압력에 따른 NOx의 변화를 나타낸다. 60MPa에서 약간 동떨어진 데이터가 나타났지만, 전체적으로는 커먼레일압력이 증가할수록 NOx값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 최솟값들은 10 MPa당 약 0.02 g/kWh씩 증가하였다. 이는 커먼레일압력의 증가에 따라 최고연소압력이 증가하고, 열역학 제1법칙에 따라서 연소실 내의 온도 상승에 의해 NOx 발생량이 증가하는 것이 원인으로 사료된다.

Fig. 3에는 커먼레일압력에 따른 CO의 변화를 나타내었다. CO의 경우 커먼레일압력에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단되지만, 최댓값은 커먼레일압력이 증가할수록 소폭 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 커먼레일압력의 증가에 따라 연소 압력의 증가와 함께 CO가 생성되기 어려운 상태가 되기 때문으로 사료된다.

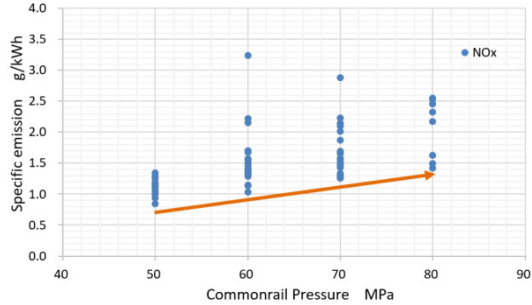


Fig. 2 NOx specific emission according to common-rail pressure

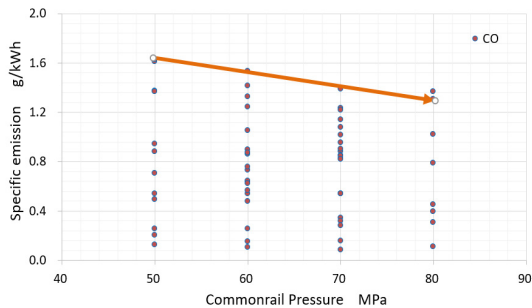


Fig. 3 CO specific emission according to common-rail pressure

## 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4에 커먼레일압력에 따른 THC의 변화를 나타내었다. THC가 0인 경우는 대부분 천연가스 질량비율이 0이거나 20% 이하의 경우에 나타났고, 최댓값은 천연가스 질량비율이 높은 곳에서 일어

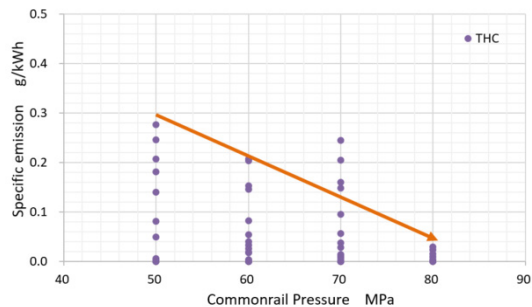


Fig. 4 THC specific emission according to common-rail pressure

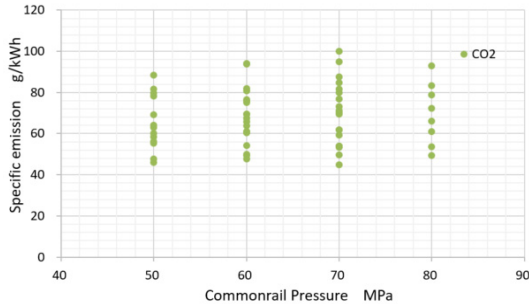


Fig. 5 CO<sub>2</sub> specific emission according to common-rail pressure

났다. 70 MPa에서 약간 동떨어진 데이터가 나타났지만 전체적으로는 커먼레일압력이 증가할수록 THC의 최댓값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 THC의 최댓값이 대부분 11.7 kW의 저부하에서 일어난 것으로, 커먼레일압력의 증가에 따라 최고 연소압력이 증가하며 연소실 내의 온도 상승에 의해 THC 발생량이 감소하기 때문이다.

Fig. 5에는 커먼레일압력에 따른 CO<sub>2</sub>의 변화를 나타내었다. CO<sub>2</sub>의 경우 커먼레일압력에 따른 영향을 거의 받지 않고 전 영역에서 고르게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 CO<sub>2</sub>의 발생량이 연료소비율 또는 에너지소비율과 관련이 있기 때문에 커먼레일압력과는 큰 연관성이 없기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 천연가스 질량비율의 영향

Fig. 6은 천연가스 질량비율에 따른 NO<sub>x</sub>의 발생율을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 산발적인 발생율을 나타내고 있어 천연가스 질량비율에 따른 NO<sub>x</sub> 발생율은 특정 형태 또는 연관성을 찾을 수 없다.

Fig. 7에는 천연가스 질량비율에 따른 CO의 발생율을 나타내었다. CO의 경우도 NO<sub>x</sub>와 마찬가지로 천연가스 질량비율에 따른 NO<sub>x</sub> 발생율은 특정 형태 또는 연관성을 찾을 수 없었다.

Fig. 8에는 천연가스 질량비율에 따른 THC의 발생율을 나타내었다. THC의 발생율은 NO<sub>x</sub> 및 CO와는 달리 일정한 형태를 나타내었다. 천연가스 질량비율의 증가에 따라 낮은 증가세를 보이

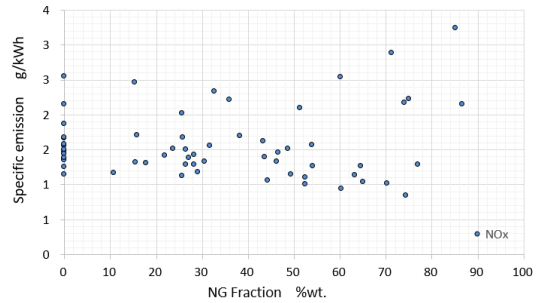


Fig. 6 NO<sub>x</sub> specific emission according to natural gas mass fraction

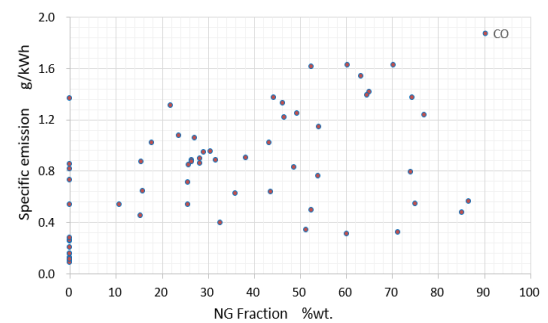


Fig. 7 CO specific emission according to natural gas mass fraction

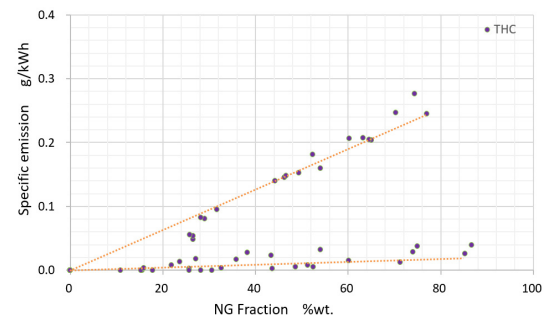


Fig. 8 THC specific emission according to natural gas mass fraction

는 형태와 급격한 증가세를 보이는 형태로 나타났다. 이는 3.3장에서 자세히 언급하기로 한다.

Fig. 9에는 천연가스 질량비율에 따른 CO<sub>2</sub>의 발생율을 나타내었다. CO<sub>2</sub>의 발생율은 천연가스 질량비율이 증가함에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. EXCEL의 선형 추세선 기능을

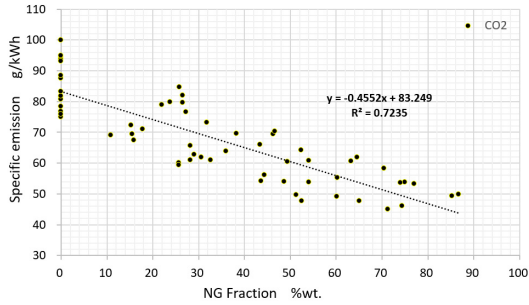


Fig. 9 CO<sub>2</sub> specific emission according to natural gas mass fraction

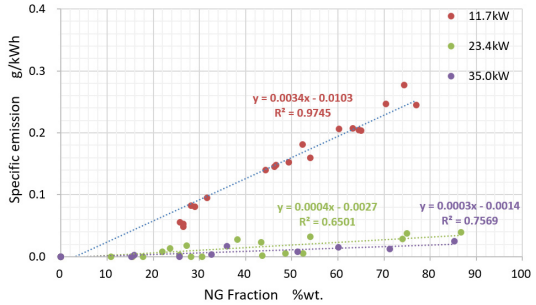


Fig. 11 THC specific emission according to engine load

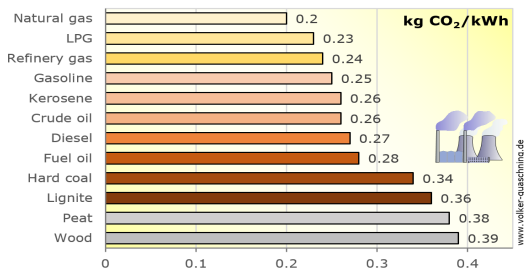


Fig. 10 Specific carbon dioxide emissions of various fuels<sup>11)</sup>

통해 확인한 수식에 따르면 기울기가 -0.4552로 경유에 비해 약 45%의 감소를 나타낸다. 이는 Fig. 10에 나타난 통계적인 수치인 연료별 CO 배출량에 따른 35%보다는 높은 수치이다. 만일 선형 추세선이 아닌 2차 다항식을 하면 좀 더 35%에 가까운 수치가 된다. 따라서 실험에 사용한 엔진에 더 많은 데이터를 확보한다면 명확한 감소율을 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 출력에 따른 에미션 특성

Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 THC와 CO<sub>2</sub>의 특성을 구체적으로 확인하기 위하여 출력에 따라 분류하여 보았다. 그 결과를 Fig. 11과 12에 나타내었다. 앞서 Fig. 8에서 언급하였듯이 THC는 2가지 형태로 나타났었는데, 이는 저부하인 11.7 kW에서 급격한 증가를 나타낸 것을 Fig. 11을 통해 확인할 수 있다. 이는 SI 엔진에서 미연탄화수소의 생성 메카니즘 중 하나인 연소실 내의 소염 때문인 것으로 사료된다. 저부하에서는 분위기 온도가 낮아

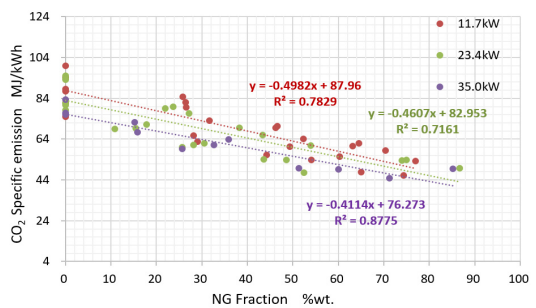


Fig. 12 CO<sub>2</sub> specific emission according to engine load

화염전파에 의해 연소하는 천연가스가 소염으로 타지 못하고 연소실 밖으로 나오기 때문이다. 출력이 증가함에 따라 소염 현상이 감소하며, 23.4 kW 이상에서는 THC가 소량만 검출되므로 이를 뒷받침해 준다.

Fig. 12에서 CO<sub>2</sub>의 배출율은 출력이 증가함에 따라 기울기가 감소하는 추세를 나타낸다. 출력이 약 12 kW 증가함에 따라 배출율은 약 4% 감소하는 경향을 보인다. 따라서 출력의 증가로 최고출력에서는 Fig. 9에서 설명한 45%보다 감소하여 Fig. 10에서 나타난 감소율 35%에 가까워질 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 연구는 천연가스 이중연료 디젤엔진에서 커먼레일압력과 천연가스 질량비율이 에미션 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였고, 이 결과는

관련 연구에 기초자료 활용되기를 기대한다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 커먼레일압력이 증가할수록 최저 NOx의 발생율이 증가하는 경향을 나타냈고, CO와 THC는 최고 발생율이 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 CO<sub>2</sub>의 경우는 커먼레일압력이 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

2) NOx와 CO의 경우, 천연가스 질량비율이 발생율에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

3) THC의 경우, 천연가스 질량비율이 증가할수록 2가지 기술키로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 출력에 따른 것으로 저출력에서만 분위기온도가 낮아 큰 기술키로 증가하였다.

4) CO<sub>2</sub>의 경우, 천연가스 질량비율이 증가함에 따라 약 45%의 감소율을 나타내었다. 이를 출력에 따라 비교하면 출력 12 kW의 증가당 약 4%씩 감소하였다.

## Author contributions

K. H. Kim : Project Administration, S. H. Jung; Supervision.

## References

1. S. C. Hwang, H. J. Kim 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. (<http://dx.doi.org/10.1007/s12239-017-0008-6>)
2. H. J. Kimm et al., 2016, "Study on the Application of DOE for Optimization of Blending Oil with Non-esterified Biodiesel Fuel at Partial Engine Load", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 51-57. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2016.20.2.051>)
3. S. D. Lee, D. K. Koh and S. H. Jung, 2013, "Combustion Characteristic of Non-esterified Bio-diesel Oil at Lower Common Rail Pressure",

- Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 11-17. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2013.17.6.011>)
4. S. H. Jung et al., 2010, "Enhancement of NOx-PM Trade-off in a Diesel Engine Adopting Bio-ethanol and EGR", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 611-616. (<http://dx.doi.org/10.1007/s12239-010-0073-6>)
5. J. K. Yeom, S. H. Jung and J. H. Yoon, 2019, "An Experimental Study on the Application of Oxygenated Fuel to Diesel Engines", *Fuel*, Vol. 248, pp. 262-277. (<http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.fuel.2018.12.131>)
6. T. Korakianitis, A. M. Namasivayam and R.J. Crookes, 2011, "Natural-gas Fueled Spark-ignition and Compression-ignition Engine Performance and Emissions", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 89-112. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2010.04.002>)
7. H. J. Jang et al., 2017, "A Study on the Performance and Combustion Characteristics with CNG Substitution Rate in a Diesel Engine", *Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 5, pp. 700-707. (<http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.700>)
8. K. H. Ryu and J. G. Won, 2019, "Effects of Compression Ratio on the Performance and Combustion Characteristics of Diesel-CNG Dual Fuel System in a Diesel Engine", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 39-48. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.4.039>)
9. G. H. Choi and O. T. Lim, 2011, "The Engine Performance and Emission Characteristics of CNG/Diesel Dual-fuel Engine by CNG Mixing Ratio", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 38-43.
10. KR, 2009, "Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ship and NOx Technical Code 2008", Haein, Busan, pp. 234-235.
11. [https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-sp ez/index\\_e.php](https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-sp ez/index_e.php).