

# 디젤엔진에서 에멀전 연료와 천연가스 이중연료의 배기가스 배출 특성 Emission Characteristics from Diesel Engine with Emulsion Fuel and Natural Gas Dual Fuel

정석호\* · 김지호\*\* · 김상원\*\* · 천정민\*\*\*\*

Suk-Ho Jung\*, Ji-Ho Kim\*\*, Sang-Won Kim\*\* and Jeong-Min Cheon\*\*\*\*

(Received 3 August 2021, Revision received 18 October 2021, Accepted 18 October 2021)

**Abstract :** As CO<sub>2</sub> reduction in diesel engines has become a very important research topic, many studies on fuel diversification are being conducted. In this study, the effect of emulsion fuel and natural gas dual fuel on exhaust gas emission was evaluated. In a 2,000 cc 4-cylinder diesel engine, the exhaust gas emission characteristics according to the injection pressure of diesel fuel and engine output were analyzed for each fuel. Emissions of NO<sub>x</sub>, CO and THC were higher in natural gas dual fuel compared to diesel and emulsion fuel. Natural gas dual fuel reduced CO<sub>2</sub> emission by up to 40% but emulsion fuel increased CO<sub>2</sub> emission by about 5% compared to diesel fuel. It was confirmed that this was affected by the ratio of dual fuel.

**Key Words :** Emission, Dual fuel, Diesel engine, Emulsion fuel, Natural gas

## 1. 서 론

국제적으로 대기오염과 지구온난화를 대비한 규제가 점점 엄격해져 가고 있다. 우리나라의 경우 가솔린 엔진을 사용하는 휘발유·가스차의 배출 허용기준은 미국의 극초저배출차량기준을 2016년부터 적용하였고, 2014년부터 디젤엔진을 사용하는 경유차는 유럽의 EURO VI 기준을 적용하였

다.<sup>1)</sup> 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 비출력이 높고 연비가 좋아 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 적게 배출되는 장점이 있으나 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 입자상물질(PM) 등이 더 많이 배출되는 단점이 있어 이를 보완하지 않으면 퇴출 위기에 직면해 있다. 유럽 연합에서는 2020년부터 지구온난화의 주범인 CO<sub>2</sub>의 저감을 승용차에도 시행하고 있어 CO<sub>2</sub>의 저감이 매우 중요한 연구 주제가 되었다. 이러한 추세

\*\*\*\* 천정민(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8629-231X) :  
선임연구원, 한국조선해양기자재연구원  
E-mail : jmcheon@komeri.re.kr, Tel : 051-400-5195  
\*정석호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6268-5864) :  
교수, 부경대학교 기계시스템공학과  
\*\*김지호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6549-3059) :  
대학원생, 부경대학교 일반대학원  
\*\*김상원(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6676-6303) :  
대학원생, 부경대학교 일반대학원

\*\*\*\* Jeong-Min Cheon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8629-231X) : Senior researcher, International Standard Team, Korea Marine Equipment Research Institute.  
E-mail : jmcheon@komeri.re.kr, Tel : 051-400-5195  
\*Suk-Ho Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6268-5864) :  
Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.  
\*\*Ji-Ho Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6549-3059) :  
graduate student, Pukyong National University.  
\*\*Sang-Won Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6676-6303) :  
graduate student, Pukyong National University.

에 맞추어 디젤엔진 연료의 다양화에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 탄소중립에 의해 CO<sub>2</sub>의 저감이 가능한 바이오 디젤유에 관한 연구<sup>2-3)</sup>와 바이오 에탄올에 대한 연구<sup>4)</sup>가 있다. 그리고 NO<sub>x</sub>를 저감시키는 에멀전 연료<sup>5)</sup>에 관한 연구와 NO<sub>x</sub> 및 CO<sub>2</sub>를 동시에 저감하는 천연가스 이중연료<sup>6-9)</sup>에 대한 연구들이 많이 있다. 특히 천연가스 이중연료에서는 T. Korakianitis들은 SI와 CI 엔진에서의 성능에 대한 연구<sup>6)</sup>를 진행하였고, 그 외에 연구진들이 디젤엔진에 성능을 미치는 CNG 혼소율 변화,<sup>7)</sup> 압축비 변화,<sup>8)</sup> 혼합을 변화<sup>9)</sup>에 대해서 연구하였다. 그러나 동일한 엔진에서 다중 연료가 CO<sub>2</sub>의 배출특성을 연구한 사례는 매우 드물다.

따라서 본 연구에서는 에멀전 연료와 천연가스 이중연료가 에미션의 배출에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 특히 디젤연료에 대한 두 연료의 첨가 비율이 CO<sub>2</sub>의 배출특성에 어떤 영향을 미치는가를 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 계통도를 Fig. 1에 나타내었다. 디젤엔진은 현대자동차의 D4EA 4기통 전자제어식이며 Table 1과 같다. 약 2,000 cc급 엔진으로 압축비는 17.7이며 최대 출력은 4,000 rpm에서 84 kW이다. 디젤엔진의 제어를 위한 ECU는 Woodward사의 MotoTron을 사용하였고, 제어 소프트웨어는 MotoHawk Control Solution을 사용하였다. 그리고 천연가스의 공급량 제어는 MoTeC의 M800을 이용하여 PC에서 실시간 제어하였다. 배기가스의 일산화탄소(CO), CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, 황산화물(SO<sub>x</sub>), 미연탄화수소(THC)의 농도는 Eutotron사의 MK-9000 모델을 사용하여 샘플링 속도를 1초로 설정하고 총 3분 동안 계측하여 PC에 저장하였다. 경유의 소비량은 CAS사의 CUW-6200 모델을 사용하여 5분간 측정하였고, 천연가스는 사용이 간편한 유리관으로 만든 면적식 유량계를 이용하여 소비량을 측정하였다. SOKKEN사의 층류유량계 LFE-100B를 흡기 필터 이후에 설치하고 Furness

Controls사의 미소 차압트랜스미터 FC0332를 사용하여 유량계 내부에서 측정된 차압을 흡기온도에 따라 환산하여 흡기유량을 계측하였다.

천연가스는 탱크 이후에 0.6 MPa의 압력조절기를 거쳐 흡기관에 한 개의 인젝터를 통해 분사되었고 에멀전연료의 경우는 별도의 장치 없이 경유와 같은 시스템으로 공급되었다.

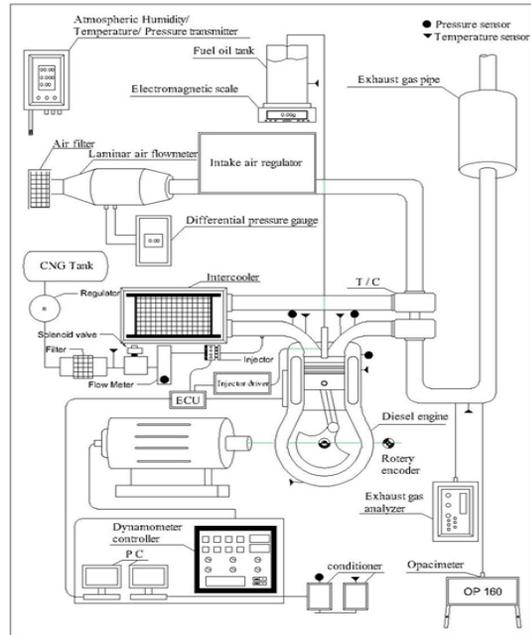


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Bore/Stroke	83/130 mm
Number of cylinders	4
Piston displacement	1,991 cc
Maximum power	84/4000 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

Table 2 Experimental conditions

Output [kW]	I.T. [°BTDC]	Pcr [MPa]	NG [%wt.]	EF [%vol.]
11.7	9/13	40~100	29~77	5
23.4	9/13	40~100	10~52	5
35.1	7/13	60~100	15~85	5

## 2.2 실험방법

실험은 엔진 회전수 2,000 rpm에서 수행되었으며 엔진 부하는 저, 중, 고부하의 순으로 11.7 kW, 23.4 kW, 35.1 kW로 설정하였다. 연료의 분사시기는 부하에 따라 적절하도록 11.7 kW와 23.4 kW에서는 9°BTDC로, 35.1 kW에서는 7°BTDC로 설정하였다. 천연가스 이중연료 실험에서의 경유 파일럿 분사시기(I.T.)는 13°BTDC로 설정하였다. 경유와 에멀전 연료의 커먼레일압력(Pcr)은 각 출력에서의 40 MPa에서 100 MPa까지 20 MPa씩 증가시키며 실험하였다. 천연가스 이중연료 실험은 천연가스의 점화원으로 이용할 경유의 파일럿 분사를 위해 에멀전 연료와 동일하게 실험하기 어려워 따로 진행하였다. 천연가스 이중연료 실험에서는 커먼레일 압력을 50 MPa에서 80 MPa까지 10 MPa씩 증가시키며 실험하였다. 이 때 천연가스 질량비율(NG)은 Table 2에 나타난 것과 같이 설정되었다. 실험하는 동안 조건이 변경되면 약 5분간의 안정기를 거친 후 계측을 실시하였고, 냉각수와 윤활유 등의 엔진 서브 시스템에 대한 각종 온도를 계측하여 운전의 안정성 여부를 판단하였다. Table 2에 나타난 EF는 에멀전 연료로 경유에 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)가 잘 혼합되도록 하기 위해 계면활성제를 혼합시켰다. 에멀전 연료는 95%의 경유와 2%의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3%의 계면활성제로 만들어졌다. 3%의 계면활성제에는 Span\_80 (C<sub>24</sub>H<sub>44</sub>O<sub>6</sub>)<sup>11)</sup>과 Tween\_80(C<sub>64</sub>H<sub>124</sub>O<sub>26</sub>)<sup>12)</sup>이 9:1로 혼합되었다. 즉, 경유 외에 혼합물이 5% 존재한다.

측정된 에미션은 체적단위이기 때문에 질량단위인 배출율로 환산하기 위해서 NOx Technical code에서 제시된 방법<sup>10)</sup>을 사용하였다. 각 에미션의 질량유량 Q<sub>mgas</sub>는 측정된 배기가스의 질량에 각 성분의 농도와 밀도비를 곱하여 환산하는데,

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

Emission	u <sub>gas</sub>
NOx	0.001589
CO	0.000966
CO <sub>2</sub>	0.001517

이를 표현하면 식 (1)과 같다.

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

여기서, Q<sub>mch</sub>는 배기가스 질량유량(kg/h)으로 흡입공기량에 공급된 연료량을 더한 값이고, C<sub>gas</sub>는 각 에미션의 계측된 농도(ppm)이며 u<sub>gas</sub>의 표준상태에서의 에미션의 밀도와 배기가스 밀도의 비를 나타내는 계수로 Table 3과 같다. Q<sub>mgas</sub>의 단위는 g/h이기 때문에 여기에 출력을 나누어 각 에미션의 배출율(g/kWh)을 계산하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 질소산화물 배출 특성

Fig. 2에는 커먼레일압력을 40 MPa부터 100 MPa까지 20 MPa씩 증가시키며 따른 부하별로 경유와 에멀전 연료의 질소산화물 배출 특성을 나타내었다. 주황색 계열은 경유를 나타내고 파란색

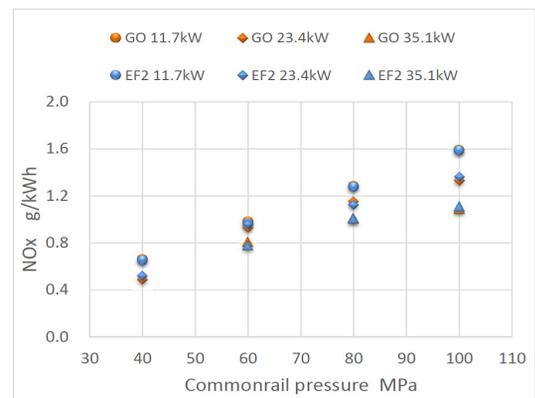


Fig. 2 NOx specific emission of diesel fuel and emulsion fuel according to common-rail pressure and output

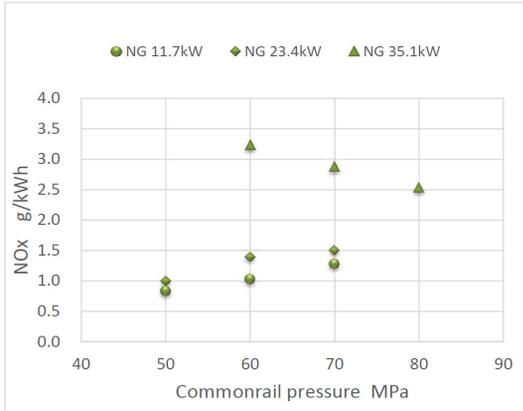


Fig. 3 NOx specific emission of natural gas dual fuel according to common-rail pressure and output

계열은 에멀전 연료를 나타내고 있다. 그리고 색깔이 연해질수록 고부하를 나타낸다. 두 연료 모두 커먼레일압력이 증가할수록 NOx 배출율은 선형적으로 증가하고 있고 특히 커먼레일압력이 올라갈수록 저부하에서 더 많이 배출율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 두 연료의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 일반적으로 에멀전 연료를 사용하면 경유에 비해 NOx 배출량이 적어지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 실제 계측된 배출량(ppm)은 에멀전 연료가 적으나 배출율의 산출방법에서 배기가스의 질량 계산에 필요한 연료의 사용량과 흡기량이 많아져 배출율로 나타낼 때는 비슷하게 나타났다. 이는 혼합된 에멀전 연료 5%에 의해 연료소비량 증가와 배기가스의 온도 상승으로 터보차저의 일이 커지면서 흡기량이 늘어난 것인 원인으로 사료된다.

Fig. 3에는 커먼레일압력이 50 MPa부터 80 MPa까지 10 MPa씩 증가함에 따른 부하별로 천연가스 이중연료의 질소산화물 배출 특성을 나타내었다. 고부하인 35.1 kW에서를 제외하면 경유와 에멀전 연료보다 조금 높은 수준의 배출율을 보였다. 그러나 35.1 kW에서는 2배에 가까운 배출율을 나타내었다. 이는 최대 연소압력이 2배 정도 높아진 것이 원인으로 사료된다. NOx 배출율을 줄이기 위해서 적절한 연소압력이 될 수 있는 조건을 찾는 연구가 요구된다.

### 3.2 일산화탄소 배출 특성

Fig. 4와 Fig. 5에는 커먼레일압력과 부하에 따른 CO 배출율의 변화를 각각 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 경유와 에멀전 연료는 천연가스 이중연료에 비해 매우 적게 배출되고 있고, 커먼레일압력이 증가함에 따라 줄어드는 경향을 나타내다가 100 MPa에서는 오히려 증가하였다. 특히 고부하에서 더 많이 배출되었다.

이는 연소실의 형상과 커먼레일압력에 따라 연소가 적절하게 이루어질 수 있는 분무 상태가 정해지기 때문인 것으로 사료된다. 한편 경유보다는 에멀전 연료가 더 많은 CO 배출율을 보이고 있는

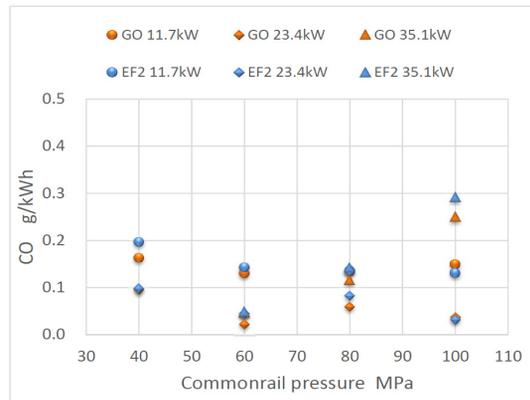


Fig. 4 CO specific emission of diesel fuel and emulsion fuel according to common-rail pressure and output

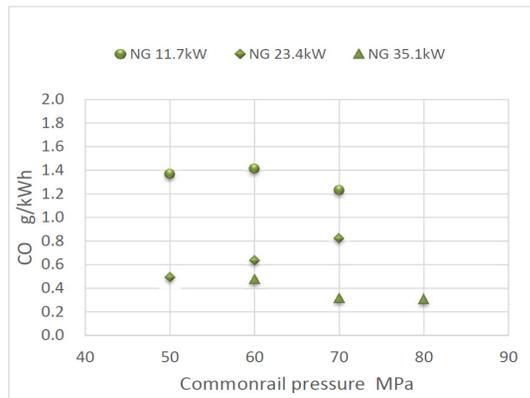


Fig. 5 CO specific emission of natural gas dual fuel according to common-rail pressure and output

데, 이는 경유에 포함되어 있는 분자들보다 더 큰 분자인 계면활성제의 연소 불량에 따른 영향으로 판단된다.

천연가스 이중연료는 저부하에서 많이 배출되는 특성을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 이는 디젤엔진에 비해 가솔린 엔진에서 CO와 THC가 많이 배출되는 것과 연관이 있다. 천연가스 이중연료는 천연가스가 경유의 착화를 점화원으로 화염전파에 의해 연소를 하기 때문에 상대적으로 많이 배출된다. 중부하에서 고부하에 가까울 정도로 적게 배출된 이유는 Table 2에 나타난 것처럼 천연가스의 질량비율이 적어 상대적으로 CO의 생성이 적어진 것으로 판단된다.

### 3.3 미연탄화수소 배출 특성

Fig. 6에 커먼레일압력과 부하에 따른 THC의 배출량 변화를 나타내었다. 경유와 에멀전 연료는 THC의 배출량이 0인 반면 천연가스 이중연료에서만 나타났다. 특히 저부하에서 600~900 ppm을 배출하였다. 이는 앞서 설명한 것처럼 천연가스 이중연료는 화염전파 특성을 가진 가솔린 엔진과 비슷한 연소를 하기 때문이다. 또한 커먼레일압력이 60 MPa에서 적게 나타난 것은 천연가스 질량비율이 낮은 것에서 기인한 것이다.

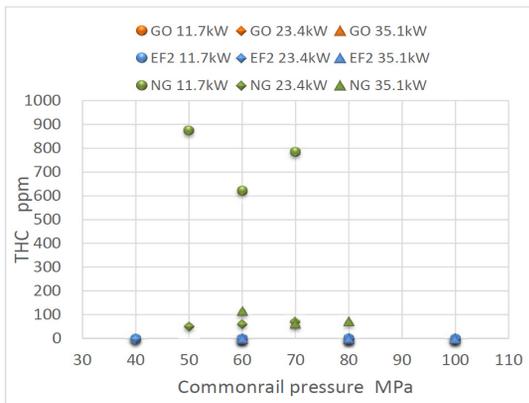


Fig. 6 THC specific emission of each fuels according to common-rail pressure and output

### 3.4 이산화탄소 배출 특성

Fig. 7은 커먼레일압력과 부하에 따른 CO<sub>2</sub>의 발생을 나타내었다. 같은 조건에서 실험한 경유와 에멀전 연료의 경우, 커먼레일이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub>의 발생율이 미소하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 에멀전 연료가 경유에 비해 약 3~5% 더 많이 배출되고 있다. 천연가스의 경우는 천연가스의 비율이 일정하지 않아 어떤 형태를 갖추고 있지는 않지만 경유에 비해 약 30~40% 적게 배출되고 있다. 이러한 내용을 분석하기 위해 Fig. 8에 경유에 대한 CO<sub>2</sub> 발생율의 비와 경유에 대한 두 연료의 비율을 나타내었다.

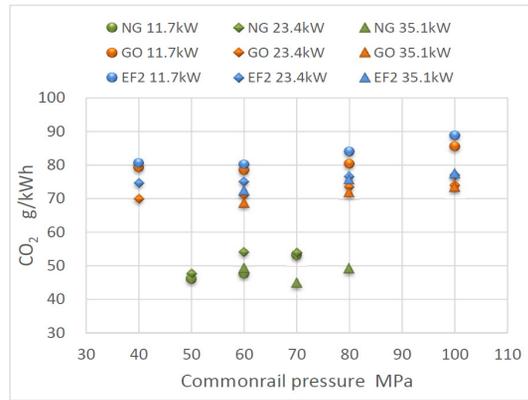


Fig. 7 CO<sub>2</sub> specific emission according to common-rail pressure and output

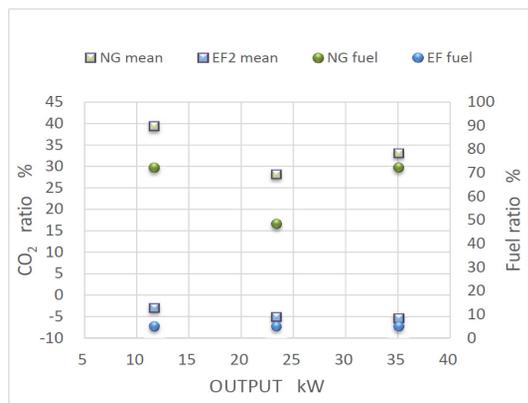


Fig. 8 Relationship reduction ratio of CO<sub>2</sub> and fuel ratio to diesel fuel

범례의 mean은 출력별로 CO<sub>2</sub>의 발생율을 각 연료의 평균을 산정하여 경유에 대한 비율로 나타낸 것이고, fuel은 전체 연료에서 각 연료의 차지 비율을 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub>의 발생율에서 “-”는 더 많이 배출되었음을 의미한다. 그래프에서 알 수 있듯이 CO<sub>2</sub> 발생을 비율과 연료의 비율이 비슷한 형태를 가진 것으로 보아 CO<sub>2</sub>의 증감율은 연료의 성분에서 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 경유와 에멀전 연료, 천연가스 이중 연료의 배기가스특성에 대해서 실험적으로 조사하였고, 이 결과는 디젤엔진의 다중연료에 관한 연구에 기초자료 활용되기를 기대하며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) NO<sub>x</sub>, CO와 THC의 배출량은 천연가스 이중 연료가 경유와 에멀전 연료에 비해 높았다.

2) CO<sub>2</sub>의 경우, 천연가스 이중연료가 경유에 비해 최대 40%까지 적게 배출되었고, 에멀전 연료는 경유에 비해 약 5% 많이 배출되었다.

3) 에미션 배출량은 모두 이중연료의 비율에 영향을 받는 것이 확인되었다.

#### Author contributions

J. M. Cheon; Project Administration, J. H. Kim and S. W. Kim; data acquisition S. H. Jung; Supervision.

#### References

1. <https://emissiongrade.mecar.or.kr/www/fd/weather/dust03.do>
2. 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. (DOI:10.1007/s12239-017-0008-6)
2. H. J. Kim 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. (DOI: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. (DOI:10.9726/kspse.2013.17.6.011)
4. S. H. Jung et al., 2010, "Enhancement of NO<sub>x</sub>-PM Trade-off in a Diesel Engine Adopting Bio-ethanol and EGR", International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 611-616. (DOI: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. (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. (DOI: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. (DOI: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.  
(DOI: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://en.wikipedia.org/wiki/Sorbitan\\_monooleate](https://en.wikipedia.org/wiki/Sorbitan_monooleate)
  12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Polysorbate\\_80](https://en.wikipedia.org/wiki/Polysorbate_80)