

4행정 디젤엔진에 연료첨가제 사용에 따른 성능 및 배기배출물 개선에 관한 연구

류영현¹ · 이영서² · 남정길[†]

(Received August 22, 2016 ; Revised September 21, 2016 ; Accepted November 15, 2016)

Improvement of the performance and emission in a four-stroke diesel engine using fuel additive

Younghyun Ryu¹ · Youngseo Lee² · Jeonggil Nam[†]

요약: 디젤엔진은 다른 엔진과 비교했을 때 열효율이 높고 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 대기오염을 유발하는 배기배출물이 발생한다는 단점도 가지고 있다. 따라서 전 세계적으로 디젤엔진을 사용하는 승용차 및 상용차, 선박 등에 대한 국제규정인 EU Euro 6, IMO MEPC Tier 3 및 US EPA Tier 4 등의 대기환경오염법이 더욱 엄격해져가고 있다. 본 연구에서는 경유를 사용하는 발전용 4행정 디젤엔진을 실험 대상으로 하였으며, 유용성 Ca계 유기금속화합물을 경유에 투입하여 실험 결과를 비교, 분석하였다. Ryu et al. 논문에서는 2행정 디젤엔진에 연료첨가제를 적용했던 연구결과를 발표하였다. 본 논문에서는 4행정 디젤엔진에 연료첨가제를 투입하여 엔진의 성능 및 배기배출물 개선에 대해서 실험을 실시하였다. 본 연구를 통해서 2행정과 4행정 디젤엔진 모두에 연료첨가제를 적용하여 그 결과를 고찰해 볼 수 있었으며 유용성 Ca계 유기금속화합물 연료첨가제가 디젤엔진의 성능(연료소비율, 배기온도) 및 배기배출물(질소 산화물, 일산화탄소)을 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

주제어: 4행정 디젤엔진, 연료첨가제, 유용성 Ca계 유기금속 화합물, 디젤엔진의 성능, 배기배출물

Abstract: High thermal efficiency and the ability to use various types of fuel are a few of the many advantages of diesel engines. However, a major disadvantage is that their exhaust emissions are more harmful to humans and the environment than that of conventional engine. Consequently, the provisions of the international emissions standards for diesel engine equipped passenger cars, commercial vehicles, and ships have become more stringent. These standards include the EU Euro 6, the IMO MEPC Tier 3, and the US EPA Tier 4. Ryu et al. published a study that applied fuel additives to two-stroke diesel engines. In this study, a four-stroke diesel engine using diesel oil for a generator is utilized as the test subject, and an experiment is performed to verify whether fuel additive can be used to improve performance and exhaust emissions. In addition, this experimental study presents research results for the application of fuel additives in both two-stroke and four-stroke diesel engines. The experimental results were compared and analyzed by placing an oil-soluble calcium-based organometallic compound in diesel oil. The results confirmed that the addition of fuel additive improved the performance (fuel consumption rate, exhaust gas temperature) and exhaust emissions (NOx, CO) of the diesel engine.

Keywords: Four-stroke diesel engine, Fuel additive, Oil-soluble calcium-based organometallic compound, Performance of diesel engine, Exhaust gas emission

1. 서론

디젤엔진은 다른 엔진과 비교했을 때 열효율이 높고 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 유해

배기배출물이 발생하는 단점도 가지고 있다. 따라서 디젤엔진을 사용하는 승용차 및 상용차, 선박, 화력발전소 등에서는 엔진의 연비 및 배기배출물 규제를 만족시키기 위

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4453-3971>): Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeollanam-do, 530-729, Korea, E-mail: jgnam@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7220

1 Korea Institute of Machinery & Materials, E-mail: yhyu@kimm.re.kr, Tel: 051-310-8125

2 Techno-bio. Co., Ltd, E-mail: yslee@technobio.co.kr, Tel: 031-352-1953

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 다양한 방안들이 고안되어야 한다[1][2].

Ryu *et al.* [3][4] 논문에서는 2행정 대형 디젤엔진에 두 가지 연료첨가제(유용성 Ca계 유기금속화합물, 유용성 Fe계 유기금속화합물)를 선박용 중질유(Heavy fuel oil)에 투입함으로써 2행정 대형 디젤엔진의 성능향상과 배기배출물 저감을 시도했던 연구 결과를 발표하였다. 2행정 대형 디젤엔진은 대양을 항해하는 대형 선박에서 주 추진 기관으로 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 경유(Diesel oil)를 사용하는 발전용 4행정 디젤엔진을 실험 대상으로 하였으며, 유용성 Ca계 유기금속화합물을 경유에 투입하여 실험 결과를 비교, 분석하였다. 경유는 디젤 승용차 및 상용차에 널리 사용되고 있는 연료유이다. 또한 레저용 선박 및 소형 어선에서도 주 연료로 사용되고 있는 연료유이다. 본 논문을 통해서 2행정과 4행정 디젤엔진 모두에 연료첨가제를 적용하여 그 결과를 고찰해 볼 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 육상 내연발전소에 설치된 경유(Diesel oil)를 연료유로 사용하는 4행정 디젤엔진을 대상으로 실험하였다. 본 실험에서의 연료첨가제 주입비율은 연료유로 사용하는 경유 200 kL에 유용성 Ca계 유기금속화합물로 구성된 연료첨가제를 200 L 주입하였다. 즉, 1000:1(0.1%)의 비율로 연료첨가제를 주입하였다. 연료첨가제는 Diesel oil storage tank에 주입하였다. 엔진 성능 시험은 (ISO 3046 - I, II, III Reciprocating internal combustion engines performance)에 따라서 시행하였다. 그리고 엔진 시험 부하는 대상설비가 도서지역에 위치한 현장의 특수한 여건을 고려하여 공급자 측과 상호 협의하여 연료첨가제 투입 전, 후의 양쪽 시험이 모두 가능한 50%, 67%, 90%(150kW, 200kW, 270kW)의 3단계 엔진 부하에서 실험을 실시하였다. 실험을 시작하기 전에 30분 이상 부하를 안정시켜 전체기관의 배기온도가 안정된 열적 평형상태가 되도록 한 후에 실험을 진행하였다. 실험 중에는 대기압력 및 과급기(Turbocharger) 입구 공기온도 등이 변하기 때문에 정격출력 유지가 곤란하다. 따라서 실험 후 ISO 표준조건으로 환산된 출력에 해당하는 연료소비를 비교, 분석 하였다. 본 연구에서는 연료첨가제의 투입 전, 후에 엔진성능(연료소비율, 배기온도) 및 배기배출물(질소 산화물, 일산화탄소) 특성을 비교, 분석 하였다. Table 1에서는 본 실험에서 사용된 엔진의 사양을 보여준다. 본 실험에서 사용된 엔진은 쌍용중공업에서 제작된

엔진으로서 6기통, 수냉식의 과급기가 부착된 4행정 디젤엔진이다. 엔진 입/출구 윤활유 온도는 $60 \pm 10 / 66 \pm 10$ °C 이며, 자켓 냉각수(Jacket water) 엔진 입/출구 온도는 $70 \pm 10 / 75 \pm 10$ °C 이다. Table 2에서는 본 실험에서 사용된 연료의 성상을 보여주고 있다. 경유에 유용성 Ca계 유기금속화합물 첨가제를 0.1%의 비율로 투입한 연료유와 기본연료로 사용된 경유의 연료성상 비교를 보면, 연료첨가제가 투입된 연료유의 탄소함유량은 감소하였고, 산소함유량은 증가하였음을 발견할 수 있다. 연료 시료는 엔진부하 실험 중에 Diesel oil service tank에서 약 3 L 가량 채취하여 분석하였다. 배기배출물 측정은 독일 IMR사에서 생산된 IMR 3000 모델을 사용하여 출력별로 출력안정 후 25분부터 5분 간격으로 각각 3회 측정하였다. IMR 3000의 측정 원리는 전기화학 셀(Electrochemical cell) 법으로 측정하는 측정기이다. Figure 1은 본 연구에서 사용된 엔진에 대한 실험장치 개략도이다.

Table 1: Test engine specification

Item	Description
Engine type	4 stroke cycle, water cooling L type with turbo charger, 6L18CX
Combustion type	Direct injection type
No. of cylinders	6
MCR output	300 kW
MCR rpm	900 rpm
MCR P-max	100 kg/cm ²
Turbo charger type	NHP-15
Turbo charger rpm	43,800 rpm

Table 2: Properties of the diesel oil and added diesel oil where, added diesel oil = diesel oil dosed additives

Item	Diesel oil	Added fuel oil
Carbon, %	86.28	86.08
Hydrogen, %	13.45	13.41
Oxygen, %	0.17	0.40
Nitrogen, %	0.02	0.02
Sulphur, %	0.08	0.08
Ash, %	0.00	0.00
Moisture, %	0.00	0.00
Specific gravity(15/4°C)	0.8380	0.8370
Higher heating value, kcal/kg	10823	10820

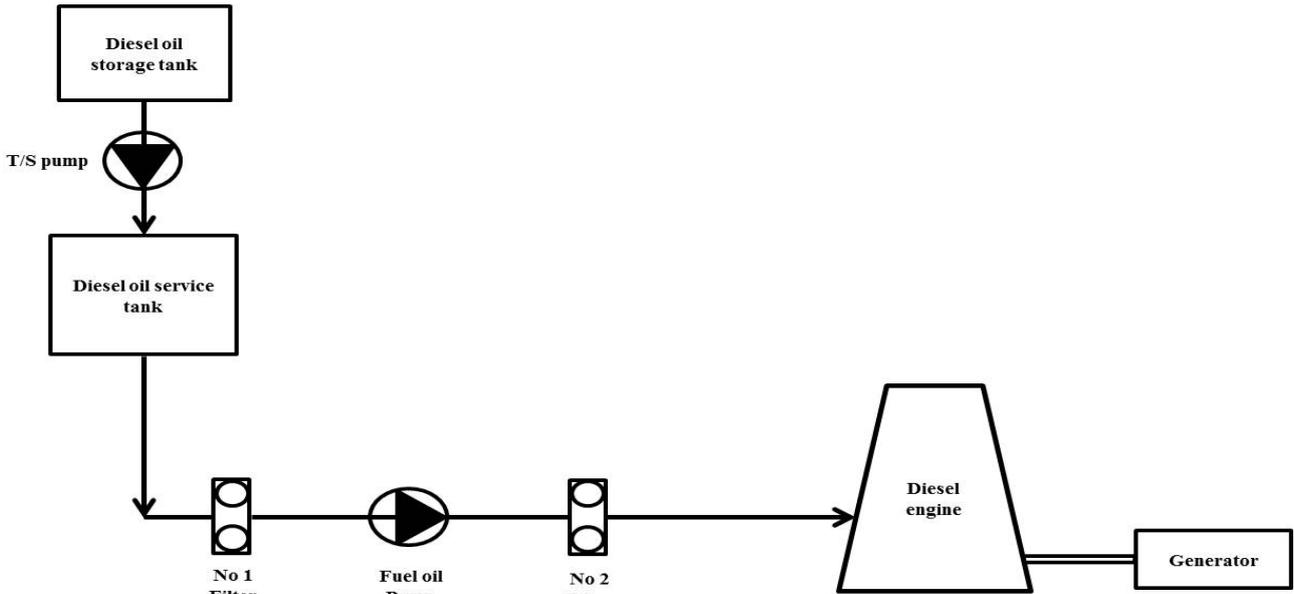


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Table 3과 Figure 2는 각 엔진부하별로 연료소비율의 결과를 보여준다. 이 결과는 실험 시 대기압력 및 과급기 (Turbocharger) 입구 공기온도 등이 변하기 때문에 정격출력 유지가 곤란하여 실험 후 연료의 저위 발열량 등이 적용되어진 ISO 표준조건으로 환산된 출력에 해당하는 연료소비율을 비교, 분석한 결과 값이다. 연료는 서비스 탱크로부터 공급받았으며, 연료소비량 산출은 한국검사정공사에서 제출한 탱크 표(Tank table)를 이용하였다. 누설된 연료유는 엔진에서 누설유 탱크(Leak oil tank)로 유입되는 라인에서 비이커를 이용하여 측정하였다. 연료소비율의 감소는 엔진 부하 50% 부하에서는 4.5% 감소하였고, 75% 부하에서는 0.4% 감소하였다. 100% 부하에서는 0.2% 감소하였다. 2행정 대형 디젤엔진에서 실험했던 Ryu *et al.* [3][4]의 논문과 비슷한 결과를 얻게 되었다. 이는 유용성 Ca계 유기금속 화합물 연료첨가제의 엔진 연소실내의 연소 촉진 영향 때문이라고 판단된다. 본 실험 결과에서는 시험구간 전 부하(50%~100%)에서 연비가 개선됨을 확인 하였다. 특히, 50% 엔진부하에서 연료첨가제의 영향이 가장 컸다. 이것은 정격부하 근처 보다는 부분부하에서 엔진의 성능개선이 더 높다고 판단된다.

Table 3: Specific fuel consumption rate by added additive

Load (kW)	Diesel oil (g/kWh)	Added fuel (g/kWh)	Deviation	Ratio (%)
150 (50%)	265.00	253.00	-12	-4.5
225 (75%)	240.00	239.00	-1	-0.4
300 (100%)	233.00	232.50	-0.5	-0.2

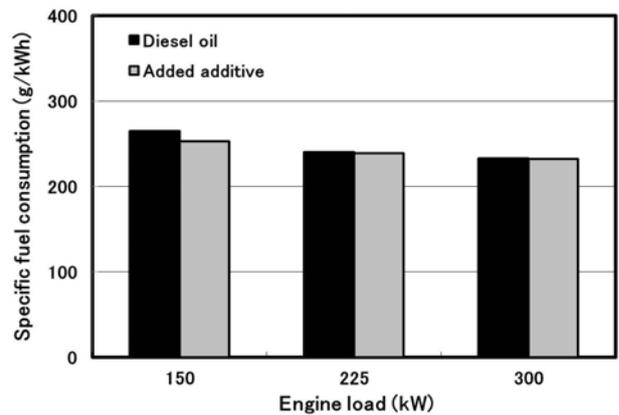


Figure 2: Specific fuel consumption rate by engine loads(50, 75, 100%)

3.2 배기온도

Table 4와 Figure 3은 연료첨가제가 투입되지 않은 순수한 경유와 연료첨가제가 투입된 연료유 사이의 각 부하에서 엔진의 연소 후 배기온도를 비교한 결과를 보여준다. 각각의 값은 각 엔진 부하별로 3회 측정하여 평균값을 나타내었다. 엔진부하 50%에서의 부하에서는 배기온도가 3.5% 감소하였으며, 67%, 90% 부하에서는 각각 2.9%, 0.9% 감소하였다. 즉, 배기온도의 결과도 이전의 논문이었던 Ryu *et al.* [3][4] 논문과 비슷한 결과를 얻게 되었다. 경유에 연료 첨가제를 투입함으로써 전 부하에서 배기온도가 감소됨을 확인 하였다. 이것은 연료 첨가제에 포함되어 있는 분산제에 의해서 연료를 분산시켜 연료를 미립화, 균질화 하여 엔진 연소실에서 안정된 연소를 통해 배기 온도가 낮아졌다고 판단된다. 즉, 연료첨가제의 영향으로 실린더 내의 연소가 촉진되어 후연소가 줄어들어 엔진의 정미출력이 향상된 결과라고 할 수 있다. 이것은 배기온도는 낮아지고 열효

율은 좋아진 결과라고 생각된다. 연료소비율과 마찬가지로 배기온도의 결과도 엔진 부하가 상승할수록 감소율이 작아졌다. 이는 67%, 90% 부하 영역보다는 50% 부하 영역에서 연료첨가제의 영향이 증가한다고 판단된다. 또는 이 결과는 정격부하 근처 보다는 부분부하에서 연료첨가제에 의한 성능개선 효과가 크다고 해석할 수 있다.

Table 4: Exhaust temperature by added additive

Load (kW)	Diesel oil (°C)	Added additive (°C)	Deviation	Ratio (%)
150 (50%)	297	287	-10	-3.5
200 (67%)	316	307	-9	-2.9
270 (90%)	321	318	-3	-0.9

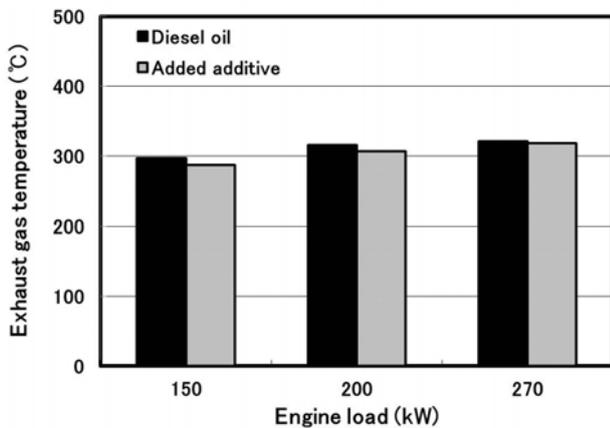
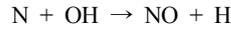
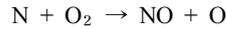
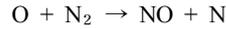


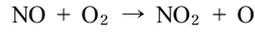
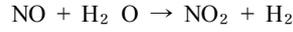
Figure 3: Exhaust temperature by engine loads(50, 67, 90%)

3.3 질소 산화물(NOx)

Tables 5, 6, 7과 Figure 4는 각 부하에서 엔진의 연소 후 질소산화물 배출량을 각각 보여준다. 일반적으로 질소산화물은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)의 합을 의미한다. Tables 5, 6, 7은 각 부하에 대한 일산화질소와 이산화질소 발생량을 각각 보여주고 있다. 각각의 값은 각 부하마다 3회 측정하여 그 평균값을 표기하였다. 경우에 연료첨가제를 투입함으로써 각각의 엔진부하인 50%, 67%, 90%에서 1.1%, 1.3%, 2.7%가 각각 감소하였다. 즉, 질소산화물은 높은 출력에서 저감율이 크고 낮은 출력에서는 저감율이 작아지는 결과를 보여주고 있다. 질소산화물의 대부분은 일산화질소이며, 이산화질소는 약간 존재한다[1][2]. 이산화질소는 연료첨가제 투입 후에 증가하였으며 이는 연료첨가제의 산화촉진의 영향 때문이라고 판단된다. 이산화질소는 증가하였으나, 일산화질소가 많이 감소하여 결과적으로 질소산화물은 감소하였다. 질소 산화물은 대부분 공기 중에 포함되어 있는 질소로부터 발생하고 일부는 연료 중에 있는 질소로부터 생긴다[1][2][4]. 일산화질소 발생 반응식은 다음과 같다[1][2][4].



또한, 이산화질소 반응식은 다음과 같다[1][2][4].



질소 산화물은 엔진 연소 중에 또는 연소가 끝난 직후에 주로 발생하는데, 엔진 연소를 위해서 주입되는 공기 중에 포함되어 있는 질소로부터 발생하는 질소 산화물을 열생성(Thermal) NOx라 하고, 연료 중에 있는 질소로부터 발생하는 질소 산화물은 연료(Fuel) NOx라 한다[1][2][4]. 본 실험에서 연료첨가제가 투입되어 질소 산화물이 감소한 이유는 연료 첨가제의 투입으로 연소실내 산소량이 증가하여 연소실에 공급된 공기량이 감소하였기 때문에 결과적으로 열생성(Thermal) NOx가 감소한 결과라고 판단된다[1][2][4]. 또한 배기온도와 연료사용량 측면에서 보면 90% 부하에서 NOx 발생량이 최대가 되어야하나 67% 부하에서 질소산화물 배출량이 최대 값을 보여주는 것은 90% 부하에서 공기 과잉률이 최대가 되어 충분한 공기량에 의한 냉각효과가 있었기 때문이라고 생각된다.

Table 5: NOx for 150kW

NOx (ppm)	Diesel oil (ppm)	Added fuel (ppm)	Deviation	Ratio (%)
NO	539.0	489.1	-49.9	-9.2
NO ₂	16.7	60.6	43.9	262.9
NOx	555.7	549.7	-6	-1.1

Table 6: NOx for 200kW

NOx (ppm)	Diesel oil (ppm)	Added fuel (ppm)	Deviation	Ratio (%)
NO	566.8	537.8	-29	-5.1
NO ₂	17.4	38.7	21.3	122.4
NOx	584.2	576.5	-7.7	-1.3

Table 7: NOx for 270kW

NOx (ppm)	Diesel oil (ppm)	Added fuel (ppm)	Deviation	Ratio (%)
NO	554.3	504.7	-49.6	-8.9
NO ₂	14.0	48.4	34.4	245.7
NOx	568.3	553.1	-15.2	-2.7

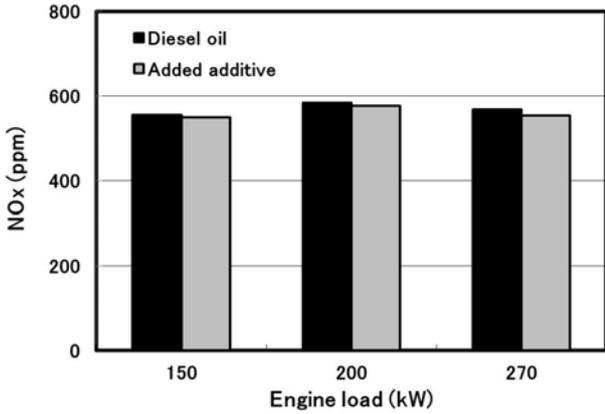


Figure 4: NOx by engine loads(50, 67, 90%)

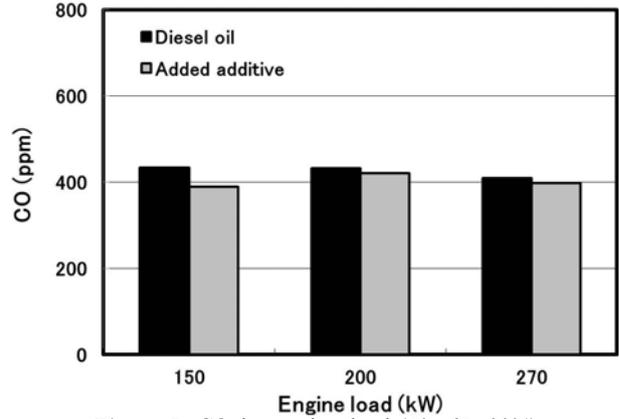


Figure 5: CO by engine loads(50, 67, 90%)

3.4 일산화탄소(CO)

Table 8과 Figure 5는 각 부하에서 엔진의 연소 후 배출된 일산화탄소 배출량을 보여준다. 일산화탄소도 질소산화물과 마찬가지로 각 부하마다 3회씩 측정하여 그 평균값을 비교하였다. 50% 부하인 150kW에서는 10.1%가 감소했음을 보여준다. 67% 부하인 200kW에서는 2.8% 감소했으며, 90% 부하인 270kW에서는 2.8% 감소하였다. 이는 Table 2의 연료 성상에서 그 원인을 찾을 수 있다. 연료첨가제를 투입함으로써 탄소 함유량은 감소하였고 산소 함유량은 증가하였다. 이러한 이유로 일산화탄소가 감소하였다고 생각된다. 이러한 결과는 Ryu *et al.* [5]의 논문에서도 비슷한 결과를 볼 수 있다. Ryu *et al.* [5] 연구에서는 합산소 연료인 Dimethyl ether(DME)를 혼합하여 일산화탄소가 저감됨을 확인했던 연구결과가 있다. 일산화탄소는 농후한 연료/공기비에서 연소 중에 발생하는데, 연소실에서 연소되지 않고 남은 탄소 중에서 일부가 일산화탄소로 남게 된다[1][2]. 즉, 일산화탄소는 불완전 연소의 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다[1][2]. 불완전 연소로 인해서 일산화탄소 발생량이 증가하는데, 연료첨가제의 영향으로 연소가 안정되어 일산화탄소 배출량이 감소하였다고 생각된다. 일산화탄소는 67%, 90% 부하에서보다 50% 부하에서 감소율이 현격하게 높은 결과를 나타내고 있다. 이 결과도 정격부하 근처보다는 부분부하에서 일산화탄소 발생량 저감효과가 크다고 볼 수 있다. 결과적으로 연료소비율과 배기온도의 결과와 마찬가지로 연료첨가제의 영향으로 연소성이 개선되어졌기 때문이라고 판단된다.

Table 8: CO by added additive

Load (kW)	Diesel oil (ppm)	Added additive (ppm)	Deviation	Ratio (%)
150 (50%)	433.8	389.8	-44	-10.1
200 (67%)	432.8	420.8	-12	-2.8
270 (90%)	410	398.5	-11.5	-2.8

4. 결 론

본 연구에서는 4행정 디젤엔진에 유용성 Ca계 유기금속 화합물 연료첨가제를 경유에 적용하여 보았다. 엔진의 성능(연료소비율, 배기온도) 및 배기배출물(질소 산화물, 일산화탄소)에 주는 영향들을 조사하기 위해서 150 kW/50%, 200 kW/67%, 270 kW/90%의 3단계에 대한 엔진부하에서 실험을 실시하였다. 실험 대상엔진의 기본 연료인 경유와 경유에 0.1%의 연료첨가제를 투입한 두 가지 연료유를 4행정 디젤엔진에 적용해 본 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 엔진부하 50% 부하에서는 연료소비율이 4.5% 감소하였으며, 엔진부하 75% 부하와 100% 부하 영역에서는 각각 0.4%, 0.2% 감소하였다. 전 부하 영역에서 연료소비율이 감소하였으며 연료첨가제의 연소촉진성의 영향 때문이라고 생각된다.
- (2) 배기온도는 50% 부하에서 3.5% 감소하였으며, 75%, 100% 부하에서는 각각 2.9%, 0.9% 감소하였다. 이 결과는 연료첨가제에 포함되어 있는 분산제의 영향 때문이라고 판단된다.
- (3) 질소 산화물은 각각의 엔진부하인 50%, 67%, 90%에서 1.1%, 1.3%, 2.7%가 각각 감소하였다. 이것은 연료첨가제에 포함되어 있는 산소의 영향으로 열생성(Thermal) NOx가 감소한 결과라고 생각된다.
- (4) 마지막으로 일산화탄소는 50%, 67%, 90% 부하에서 10.1%, 2.8%, 2.8%가 각각 감소되었음을 알 수 있었다. 일산화탄소는 엔진의 연소실에서 연소 중에 연소 되지 않고 남은 탄소가 일산화탄소로 남게 되는데, 연료첨가제가 엔진의 연소에 영향을 주어 안정된 연소가 일산화탄소 배출에 영향을 주었을 거라고 생각된다.

본 연구를 통해서, 경유를 사용하는 4행정 디젤엔진에 유용성 Ca계 유기금속화합물 연료 첨가제를 투입함으로써 전 부하에서 엔진 성능(연료소비율, 배기온도) 및 배기배출물(질소 산화물, 일산화탄소)이 개선됨을 확인 할 수 있었다. 연료

첨가제를 사용함으로써 2행정 디젤엔진뿐만 아니라 4행정 디젤엔진의 연비 및 배기배출물도 개선 될 수 있음을 확인 하였다. 또한, 선박용 중질유뿐만 아니라 경유에도 연료첨가제를 투입함으로써 개선될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

References

- [1] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, USA, McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [2] W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2ND Edition, Pearson, 2004.
- [3] Y. H. Ryu, Y. S. Lee, and J. G. Nam, "An experimental study of the fuel additive to improve the performance of a 2-stroke large diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 39, no. 6, pp. 620-625, 2015.
- [4] Y. H. Ryu, Y. S. Lee, and J. G. Nam, "Performance and emission characteristics of additives-enhanced heavy fuel oil in large two-stroke marine diesel engine," Fuel, vol. 182, pp. 850-856, 2016.
- [5] Y. H. Ryu and T. Dan, "Combustion and emission characteristics of diesel engine by mixing DME and bunker oil," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 7, pp. 117-122, 2012.