

발전용 바이오중유의 품질 및 성능 평가 특성 연구

하중환^{*,**} · 장은정^{*} · 권용재^{**,†}

^{*}한국석유관리원 석유기술연구소

^{**}서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과

(2015년 9월 14일 접수; 2015년 9월 23일 수정; 2015년 9월 25일 채택)

A Study on the Performance Evaluation and Quality for Power Bio-Fuel Oil

Jong-Han Ha^{*,**} · Eun-Jung Jang^{*} · Yong-Chai Kwon^{**,†}

^{*}Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
Chungcheongbuk-do, 28115, Korea

^{**}Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

(Received September 14, 2015; Revised September 23, 2015; Accepted September 25, 2015)

요약 : 최근 정부는 신재생에너지 연료 혼합 의무화 제도(RFS)와 신재생에너지 공급 의무화제도(RPS)를 적극 추진하고 있어 신재생에너지 연료의 중요성은 그 어느 때보다도 부각되고 있으며 적극적인 연구가 필요한 때이다. 이의 일환으로 발전용 바이오중유 시범보급사업과 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 연구에서는 바이오중유의 성능평가기준(안) 마련을 위해 중유와 바이오중유의 연료품질 특성 및 산업용 보일러에서 연소 후 배출되는 먼지, 배출가스의 양을 비교 연구하였다. 연구결과 바이오중유를 사용할 경우 먼지와 황산화물 등 유해배출가스가 현저히 저감 되는 것이 밝혀졌다.

주제어 : 발전용 바이오중유, 신재생에너지 연료 혼합 의무화 제도(RFS), 신재생에너지 공급 의무화제도(RPS), 원료물질, 팜유, 동·식물성 유지

Abstract : Recently, the government is actively promoting the RFS(Renewable Fuel Standards) and RPS(Renewable Portfolio Standards). Therefore, the importance of renewable energy fuel is being highlighted more than ever. Now is the time required active research in Korea. Since power bio-fuel oil demonstration project is underway dissemination to meet RPS quota. In this study, we investigated emission performance to make the performance standard draft of bio-fuel oil. In addition, the quality properties of the fuel oil and bio-oil, and after combustion in industrial boilers and compared the amount of exhaust gas. It was reduced emissions of bio-oil in industrial boilers due to bio-fuel properties as compare with fuel oil.

[†]Corresponding author
(E-mail: kwony@seoultech.ac.kr)

Keywords : Power bio-fuel oil, Renewable Portfolio Standard(RPS), Feedstock, Palm oil, Animal and vegetable oil

1. 서 론

최근 정부는 국가 온실가스 감축 목표를 2030년 배출전망치(BAU, Business as usual) 대비 37%로 발표하였다. 12월 출범 예정인 新기후체제를 앞두고 국제적인 책임과 에너지 신산업 혁신의 기회로 적극 활용한다는 취지에서 목표를 정한 것이다. 2014년에는 “제2차 에너지기본계획”을 통해 신재생에너지 보급목표를 2035년까지 11%로 설정하였고, 제4차 신재생에너지 기본계획에서는 신재생에너지 연료 혼합 의무화 제도(RFS) 추진을 위해 바이오디젤의 혼합의무비율 로드맵을 발표하고 바이오에탄올과 바이오가스를 추후 검토하기로 하였다. 이처럼 신재생에너지 연료의 중요성은 그 어느 때보다도 부각되고 있으며 적극적인 연구가 필요한 때이다.

한편, 2012년부터 시행된 신재생에너지 공급의무화제도(RPS, Renewable Portfolio Standard)는 발전 사업자가 총 발전량의 일정 비율을 신재생에너지로 공급하는 것을 의무화하는 제도이다. 따라서 발전사에서는 의무공급량 이행을 위해 다양한 에너지원을 활용하고 있으며 그의 일환으로 바이오중유를 검토하고 있다. 이를 위해 발전용 바이오중유 시범보급사업 추진에 관한 고시(산업부고시 2014-1호)가 2014년 1월에 공포되어 이와 관련된 연구와 시범보급 사업이 활발히 진행되고 있다[1].

시범보급 사업의 시작은 발전용 바이오중유 상용화 연구 추진단 구성이 시초가 되어 시범보급과 법령개정안 마련을 위한 발전용 바이오중유 상용화 기반마련 연구와 발전설비 영향성 평가 및 운전가이드 개발을 위한 발전용 바이오중유 발전소 적용기술 개발연구가 세부사업으로 추진되고 있다. 연구추진단에는 한국중부발전, 한국서부발전, 한국남부발전, 한국동서발전 등 발전 4개사와 한국지역난방공사가 참여하고 연구수행은 한국석유관리원과 한전전력연구원이 전담하고 있으며, 시범보급 사업을 위한 대상 발전사업자와 생산업자는 발전 5개사 및 생산 15개사가 산업통상자원부 장관으로부터 지정을 받았다[2].

바이오중유란 동·식물성 유지나 알코올 등을 유지와 반응시켜 만든 지방산에스테르를 혼합·제조하여 생산한 제품이다. 원료로는 주로 팜 열매로부터 기름을 추출하고 남은 공정 부산물과 동물성유지 및 바이오디젤 공정 부산물(pitch) 등이 활용된다. 국내에서 사용하는 주요 원료 물질은 팜 오일 계통의 팜 원유(CPO), 정제 탈취 팜유(RBDPO), 팜 지방산(PFAD), 팜 스테아린, 팜 산유(PAO) 등과 동물성유지인 우지, 돈지, 그리고 바이오디젤(BD), 바이오디젤 피치(BD pitch) 등이 사용된다. 팜 원유는 팜 열매를 착유한 오일이며 정제 탈취 팜유는 팜 원유를 물리적으로 정제(탈검, 탈색, 탈취)하여 생산한 정제 팜 오일이다. 팜 스테아린은 정제 팜유의 저온 분리공정을 통해 생산된 스테아린이며 팜 산유는 팜 원유의 화학적 정제과정 중의 탈검·염기 중화 후 분리된 비누분을 산처리 한 오일이다. Table 1은 바이오중유의 원료 물질을 나타내었다[2-4].

바이오중유는 온실가스저감 효과를 거둘 수 있는 신재생에너지로서 1차 에너지 소비량의 97%를 수입에 의존하고 있는 열악한 국내 에너지 시장상 에너지 믹스를 보다 다양하게 가져갈 수 있게 하는 이점도 있다. 따라서 발전사에서는 기존의 석유계 중유를 바이오중유로 대체하여 생산하는 발전 비율에 따라 신재생에너지공급인증서(REC, Renewable Energy Certificate)를 획득하게 되며 이때, 바이오중유의 REC 가중치는 1이 된다.

석유 및 석유대체연료사업법에는 바이오디젤연료유, 바이오에탄올연료유 등이 석유대체연료로 지정되어 있으며 품질기준과 성능평가기준이 고시되어 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 향후, 바이오중유의 보급 활용에 대비하여 성능평가기준 마련을 위한 중유와 바이오중유의 연료품질 특성 비교평가 및 산업용 보일러에서의 연소 후 배출되는 먼지 및 각종 배출가스의 양을 비교 연구하였다.

Table 1. The raw materials of bio fuel oil

Palm Oil based	Crude Palm Oil(CPO) Refined Bleach Deodorized Palm Oil(RBDPO) Palm Fatty Acid Distillate(PFAD) Refined Bleach Deodorized Stearin(Palm Stearin) Palm Acid Oil(PAO)
Biodiesel based	Biodiesel(BD100) Biodiesel Pitch(BD Pitch)
Animal oil based	Tallow Lard
Etc Vegetable oil based	Cashew Nut Shell Liquid(CNSL)

Table 2. Main materials of test sample

Power bio-fuel oil (A)	Palm oil(45~50%) Biodiesel pitch(30~35%) Fatty acid methyl ester(10~15%)
Power bio-fuel oil (B)	Animal oil(65~70%) Biodiesel pitch(30~35%)
Power bio-fuel oil (C)	Palm oil(40~45%) Biodiesel pitch(15~20%) Animal oil(15~20%) Free Fatty Acid(20~25%)

2. 실험

2.1. 평가용 바이오중유 원료물질

본 연구에서 사용된 연료는 현재 발전사에서 사용하고 있는 석유계 일반 중유(B-C유)로 황 함량 0.3 무게%이하의 규격 제품과 바이오중유를 평가용 연료로 선정하였으며 발전사별 바이오중유 성분 구성은 Table 2와 같다.

2.2. 평가용 연료 품질 분석 방법

평가용 바이오중유는 시범보급 고시 상의 품질 기준에 나와 있는 항목에 대하여 국가표준시험방법 및 관련 국제표준을 적용하여 품질을 분석하였다. 품질 분석 항목과 시험법은 Table 3와 같다[1][3-4].

2.3. 평가용 보일러 및 운전조건

본 연구에 사용된 보일러는 시간당 수증기 발생량이 3톤인 노통연관식 보일러(한신보일러사, HNP 705)를 사용하였으며 Table 4에 보일러 제

원을 나타내었다.

시험에 사용된 중유와 바이오중유는 원활한 연료 흐름을 위해 서비스트랭크에서 약 90℃ 정도로 가온한 것을 산업용 보일러에 공급하여 연소시켰다. 보일러의 부하율은 50%로 맞췄는데, 이는 시간당 보일러가 최대 발생시킬 수 있는 수증기량에 대한 실제 운전 조건에서의 수증기 발생량의 비를 뜻한다. 본 연구에 사용되는 보일러는 3톤 용량으로 50% 부하율이란 시간당 1.5톤의 수증기를 발생시킬 수 있는 연료를 공급하여 연소시키는 조건을 의미한다. 이때, 시간당 발생한 수증기량은 무게를 측정할 수 없기 때문에 공급된 보일러수의 양으로 부하율을 측정한다. 또한 발생한 수증기는 모두 대기 중으로 방출하며 보일러를 연속적으로 운전하였다.

50% 부하율 운전 조건에 필요한 중유와 바이오중유 연료량과 실제 부하율을 Table 5에 나타내었다.

Table 3. The Quality standard and test method of power bio-fuel oil

Property	Limit	Test method	
Flash point (°C)	min. 70	KS M ISO 2592	
Viscosity (40°C, mm ² /s)	20 ~ 100	KS M ISO 3104	
Carbon residue (wt.%)	max. 10	KS M ISO 10370	
Sulfur (wt.%)	max. 0.1	KS M ISO 8754	
Ash (wt.%)	max. 0.10	KS M ISO 6245	
Copper strip corrosion (50°C, 3h)	max. 1b	KS M ISO 2160	
Pour point (°C)	max. 27.5	KS M 2016	
Density (15°C, kg/m ³)	max. 991	KS M 2002	
Water (wt.%)	max. 0.20	KS M 0010	
Acid number (mg KOH/g)	max. 25	KS M ISO 6618	
Alkali metal (mg/kg)	Na	max. 70	AAS
	Ca	max. 30	AAS
	K	max. 70	AAS
Iodine number (g/100g)	max. 120	EN 14111	
Nitrogen (wt.%)	max. 0.3	KS M 2112	
Vanadium(V) (mg/kg)	max. 50	ICP	
Gross heating value (kcal/kg)	min. 9,000	KS M 2057	
Water and sediment (vol.%)	max. 0.5	KS M ISO 9030	
Si + Al + Fe (mg/kg)	max. 200	ICP	
Phosphorus(P) (mg/kg)	max. 100	ICP	

Table 4. Specifications of test boiler

Item	Unit	Specification(Type)
Boiler Type	-	Horizontal Cylinder
Combustion Gas Flow	-	3 Pass Type
Draft System	-	Forced Draft
Burner Type	-	Rotary Type
Forced Draft Fan	-	Turbo Fan Type
Capacity (Steam Generation)	kg/h	3,000
Heat Transfer Area	m ²	54.5
Maximum Steam Pressure	kg/cm ²	10
Oil Consumption (Heavy Oil, B-C)	kg/h	25 ~ 250
Boiler Drum Full Capacity	kg	6,420
Force Draft Fan Capacity	m ³ /h	60
Boiler Weight	kg	9,600
Stack Diameter	mm	600

Table 5. Amount of steam generation per hour and actual load

	Oil Consumption (L/h)	Steam Generation (kg/h)	Actual Load (%)
B-C	129.4	1.50	50.0
Bio Oil (A)	149.8	1.51	50.2
Bio Oil (B)	154.3	1.50	50.0
Bio Oil (C)	152.8	1.52	50.6

2.4 보일러 배출가스 먼지 농도 측정

배출가스 중의 먼지란 연료가 연소할 때 배출가스 중에 함유되어 있는 액체나 고체인 입자상 물질(Particulate matter)로 수분을 제거한 것이다. 먼지의 농도 표시는 표준상태(0°C, 760mmHg)의 건조배출가스 1 Sm³ 중에 함유된 먼지의 중량(mg)으로 표시한다. 보일러 배출가스 중의 먼지 농도는 대기환경보전법의 대기오염공정시험기준에 따라 측정하였다. 배출가스의 먼지 포집은 반자동식 채취기에 의한 방법을 사용하였으며 시료 채취 장치의 구성도는 Fig. 1과 같다. 먼지 농도 측정을 위한 배출가스 시료는 집진 장치 앞쪽에 위치한 측정공에서 채취하여 집진기에 의한 오차를 없앴다.

먼지 농도 계산에 필요한 배출가스 중의 수분의 양은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$X_w = \frac{\frac{22.4}{18} m_a}{V_m \times \frac{273}{273 + \theta_m} \times \frac{P_a + P_m}{760} \times \frac{22.4}{18} m_a}$$

- 여기서,
 X_w : 배출가스 중의 수분의 부피 백분율 (%)
 m_a : 흡습 수분의 질량 ($m_{a2} - m_{a1}$) (g)
 V_m : 흡인한 건조 가스량 (건식가스미터에서 읽은 값) (L)
 θ_m : 가스미터에서의 흡인 가스온도 (°C)
 P_a : 대기압 (mmHg)
 P_m : 가스미터에서의 가스의 게이지압 (mmHg)

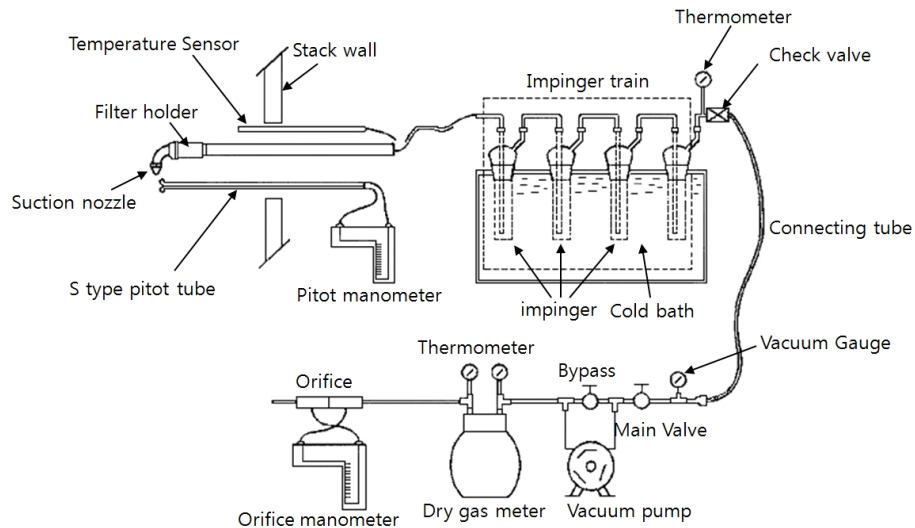


Fig. 1. A schematic diagram of an apparatus for measuring water and dust

수분 측정이 완료된 후에는 시료채취 장치를 이용하여 배출가스 중의 먼지량을 측정하였다. 먼지 포집에는 실리카 섬유제 골무형 여과지(Whatman™, GE사, CAT No. 2812-259)를 사용하였다. 여과지는 110°C에서 3시간 동안 건조한 후에 실리카겔이 들어 있는 데시케이터에서 실온까지 방냉한 후에 0.1 mg까지 무게를 재고, 여과지 홀더에 넣어 결합한 다음 흡인관을 측정공 안으로 삽입한다. 흡인관에 결합되어 있는 S자형 피토관과 연결된 경사마노미터로 배출가스의 동압을 측정하였다. 측정된 동압으로 배출가스의 유속을 구하여 배출가스 유속과 동일한 속도(등속 흡인)로 시료가 채취될 수 있도록 진공펌프에 연결된 오리피스 압력을 조정하였다. 배출가스의 동압 측정, 등속 흡인 등을 위한 장치는 CleanAir® Express Method 5 Sample Train(CleanAir사, 미국)을 이용하였으며 Fig. 2의 장치와 같다.



Fig. 2. The appearance of CleanAir® Express Method 5 Sample Train

먼지는 20분 동안 같은 속도로 흡인하여 채취하고 동일 연료에 대하여 5회씩 샘플시료를 채취하였다. 시료를 채취하는 동안 배출가스의 온도, 동압, 정압, 건식 가스미터 입·출구 온도 및 진공 게이지압 등을 기록하며, 시료 채취가 끝난 다음 채취된 건식 가스량을 계산하여 등속흡인계수(isokinetic sampling rate)를 산출하였다.

$$I(\%) = T_s [0.00346 V_{ic} + V_m' / T_m (P -$$

여기서,

I : 등속흡인계수 (%)

P_s : 배출가스 압력 (mmHg : $760 + P_s'$),

P_s' : 배출가스 정압

T_s : 배출가스 평균 절대온도

(K : $273 + \theta_s$ (°C))

V_{ic} : 임핀저와 실리카겔에 채취된 물의 총량

$$= V_m' \times \frac{X_w}{100 - X_w} \times \frac{18}{22.4} \text{ (mL)}$$

V_m' : 건식가스미터에서 읽은 가스시료 채취량 (m³)

T_m : 건식가스미터의 평균 절대온도 (K)

P : 측정공 위치의 대기압 (mmHg)

ΔH : 오리피스 압차 (mmH₂O)

t : 총 시료 채취시간 (min)

v : 배출가스 유속 (m/s)

A_n : 노즐의 단면적 (cm²)

등속흡인계수가 100 미만이면 배출가스보다 낮은 유속으로 샘플 시료를 채취한 것이며, 100을 초과할 경우에는 배출가스보다 높은 유속으로 시료를 채취했다는 것을 의미하며 100일 경우가 가장 이상적이다. 대기환경보전법에는 시료채취에 대한 등속흡인계수가 95 ~ 105의 범위의 값을 가져야 유효한 시험으로 인정되며, Table 6에 각각의 샘플 시료 채취에 대한 5회 평균 등속흡인계수를 나타내었다.

Table 6. Average isokinetic sampling rate

	B-C	Bio Oil		
		(A)	(B)	(C)
I (%)	100.21	100.85	99.50	100.43

배출가스 중의 먼지 시료 채취가 끝나면 측정 공으로부터 흡인관을 빼내고, 흡인관으로부터 먼지가 포집된 여과지를 분리하여 여과지 보관병에 넣고 110°C로 세팅한 오븐에서 3 시간 건조한 후 실리카겔이 채워진 데시케이터로 옮겨 실온까지 방랭한 다음 0.1 mg까지 무게를 재었다. 바탕 시험용 여과지에 대해서도 위와 동일하게 실시하며, 포집된 먼지의 무게는 다음과 같은 식으로 구한다.

포집된 먼지량 = 먼지 포집 전·후의 무게 차 ±
 바탕시험용 여과지 무게 차
 배출가스 중의 실측 먼지 농도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$C_a = \frac{m_d}{V_m' \times \frac{273}{273 + \theta_m} \times \frac{P_a + \frac{\Delta H}{13.6}}{760}}$$

여기서,

C_a : 실측 먼지 농도 (mg/Sm³ dry)

m_d : 포집된 먼지량 (mg)

V_m' : 건식가스미터에서 읽은 가스시료 채취량 (m³)

θ_m : 건식가스미터의 평균온도 (°C)

P_a : 측정공 위치의 대기압 (mmHg)

ΔH : 오리피스 압차 (mmH₂O)

2.5 표준 산소농도 보정

보일러에서 배출되는 먼지의 농도는 배출가스 중의 산소 농도가 보일러 운전 조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 배출가스 중의 산소농도를 표준 산소 농도인 4%로 보정해야 하며, 다음의 식으로 표준 산소 농도일 때의 먼지 농도로 보정하였다.

$$C = C_a \times \frac{21 - O_s}{21 - O_a}$$

C : 먼지 농도 (mg/Sm³)

O_s : 표준 산소 농도(%)

O_a : 실측 산소 농도(%)

C_a : 실측 오염물질 농도(mg/Sm³)

2.6. 보일러 배출가스 SO_x, NO_x 농도 측정

시험용 연료를 보일러에서 연소한 후에 배출되는 배출가스 중에서 유해한 성분인 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)을 측정하였다. 배출가스

분석을 위한 시료는 보일러 집진 장치 전단에 위치한 연도의 한 지점에서 포집하여 관을 통해 연결된 분석기에서 실시간으로 분석하였다. 배출가스 분석에는 Fig. 3의 비분산적외선 분광광도계(Photon II, Madur사, 오스트리아)가 사용되었다. 배출가스 분석기를 이용하여 배출가스 중의 산소, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물 및 황산화물 농도를 2초 단위로 분석하였으며 먼지 농도 측정 시간 동안의 값으로 평균하였다. 또한, 먼지 농도 측정과 마찬가지로 표준 산소 농도 4%로 보정하였다.

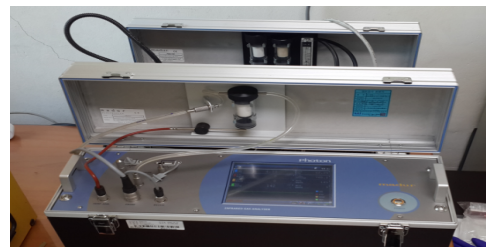


Fig. 3. The appearance of emission gas analyzer.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평가용 바이오중유 품질특성

본 연구에서 평가한 중유와 바이오중유의 품질 분석 결과는 Table 7과 같다. 주요 항목을 살펴보면 동점도(Kinematic viscosity)는 연료의 이송 및 분무성과 관련된 항목으로 유체의 끈끈한 정도를 나타내는 물리적 특성인데 바이오중유는 중유보다 대체로 동점도가 낮다. 이러한 이유로 바이오중유를 발전용 보일러에 사용할 경우 분무에 필요한 온도 설정을 중유와 다르게 제어해야 하며 연료 공급펌프의 토출량 보강과 탱크저장, 배관이송 및 가압 펌프질 시 단계별로 정밀한 온도 제어도 필요하다[6-7].

황분(Sulfur content)은 연소실 내부에서 연소하여 SO₂, SO₃ 등의 황산화물로 배출된다. SO₂는 일광산화에 의해서 SO₃로 전환되며 SO₃ + H₂O → H₂SO₄ 형태로 산성비 등의 공해문제를 야기하고 연소기의 부식을 유발하므로 그 함량을 규제하고 있다. 바이오중유는 중유에 비해 황 함량이 매우 낮아 배출가스 중에 황산화물이 거의 발생하지 않는다. 또한 연료 중에 포함된 질소

(N)가 낮아 질소산화물도 증유에 비해 적게 배출된다. 황분은 배기가스로 배출되어 대기 중 황산염을 형성하여 입자상 물질(PM) 배출에 지대한 역할을 한다. 연소 시 연료 내의 황분은 SO₂를 형성하며, 이 중 일부는 산화되어 황산염(SO₄)이 된다. 황산염과 결합한 수분은 미립자의 탄소핵 주변에 유착되어 입자상물질(PM)의 양을 증가시키기 때문에 연료의 황 함량은 입자상물질(PM)에도 큰 영향을 미친다[8]. 바이오증유는 증유 대비 연료의 황 함량이 매우 낮아 입자상물질(PM) 배출도 적어진다.

원소분석 결과 바이오증유는 탄소와 수소 함량이 증유보다 낮고 산소함량은 높는데 이는 발열량과 밀접한 관계가 있다. 즉, 탄소와 수소는 연료의 주요성분이며 산소는 조연성 물질로서 탄소 및 수소와 결합하여 발열량을 감소시킨다. 따라서

바이오증유의 발열량은 증유보다 대략 10% 정도 낮다[2]. 본 시험에 사용된 연료소비량은 바이오증유가 일반 증유보다 평균 17% 더 소비되었는데 이는 발열량 차이에 의한 것으로 보인다.

3.2. 보일러 배출가스 특성

증유 및 바이오증유를 50% 보일러 부하율 조건으로 보일러에서 연소시킨 후 먼지 포집용 여과지에 걸러진 먼지의 양상을 Fig. 4에 나타내었다. 사진에서 볼 수 있듯이 C증유의 먼지 입자는 검은색을 나타내었고, 바이오증유는 색의 농도가 다르기는 하지만 대체로 황색을 나타내었으며 색깔이 짙을수록 먼지 농도가 증가하였다.

Table 7. The physicochemical characteristics of fuel oil and bio-fuel oil

Property	Fuel oil (B-C)	Power bio-fuel oil			
		A	B	C	
Flash point (°C)	122	252	242	244	
Viscosity @40°C (mm ² /s)	140.3	43.3	44.9	34.3	
Carbon residue (wt.%)	5.5	0.8	0.8	0.4	
Sulfur (wt.%)	0.27	0.01	0.01	0.02	
Ash (wt.%)	0.018	0.017	0.009	0.008	
Copper corrosion (50°C, 3h)	1a	1a	1a	1a	
Pour point (°C)	30.0	25.0	20.0	0.0	
Density (15°C, kg/m ³)	932.8	921.2	924.7	918.6	
Water (wt.%)	0.04	0.03	0.03	0.03	
Acid number (mg KOH/g)	2.52	0.92	8.52	15.47	
Alkali metal (mg/kg)	Na	0	0	17	
	Ca	12	10	4	
	K	0	1	2	
Iodine number (g/100g)	32	54	53	85	
Nitrogen (wt.%)	0.17	0.02	0.02	0.01	
Vanadium(V) (mg/kg)	10	3	1	0	
Gross Heating value (kcal/kg)	10,572	9,422	9,390	9,367	
Net heating value (kcal/kg)	9,879	8,637	8,738	8,754	
Water and sediment (vol.%)	1.4	0.1	0.025미만	0.1	
Si + Al + Fe (mg/kg)	23	76	15	6	
Phosphorus(P) (mg/kg)	43	4	18	0	
Element contents (wt.%)	C	86.08	76.53	75.57	76.72
	H	12.70	12.53	12.02	11.54
	O	1.19	10.67	12.36	11.35

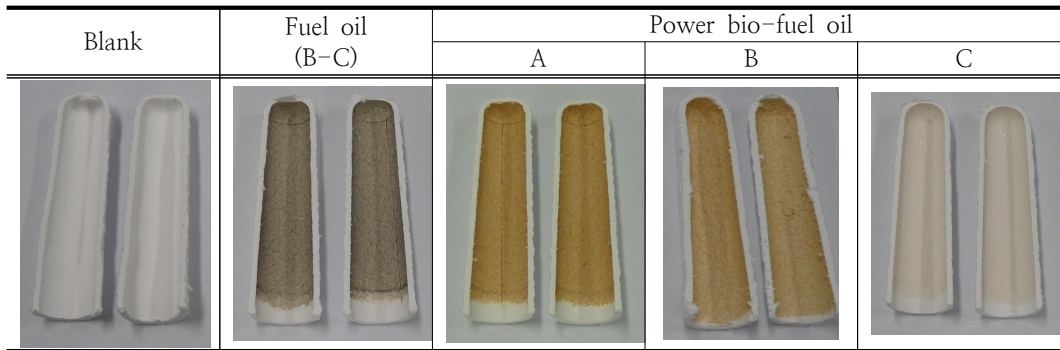


Fig. 4. The color of emission gas.

Table 8에는 시험 후의 먼지 농도와 배출가스 성분 변화를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 3종의 바이오중유가 중유보다 먼지 농도는 물론 황산화물, 질소산화물 등의 유해배출가스가 낮게 측정되었다. 특히 대기오염의 원인물질로 호흡기 질환을 일으키며 산성비의 원인이 되는 대표적인 유해물질인 황산화물은 바이오중유의 경우 전혀 배출되지 않았고 폐기중 및 각종 호흡기 질환의 원인이 되는 질소산화물은 평균 40%, 우리 몸 폐 속 깊숙이 침투하여 폐암의 원인이 되는 유해물질인 먼지는 평균 30% 감소되었다. 배출가스 중의 먼지의 발생은 연료의 품질기준 가운데 잔류탄소분(Carbon residue)과 점도(Viscosity)와 밀접한 관계가 있다. 중유와 바이오중유의 품질분석 결과에 의하면 중유의 잔류탄소분이 바이오중유보다 최대 13배 높게 나왔다. 잔류탄소분은 연료에 고온을 가했을 때 생성되는 코크상의 물질인데, 휘발유, 경유 같은 경질유보다 중유 같은 중질유에서 더 많이 발생하는 경향이 있다. 또한, 점도는 중유가 바이오중유보다 최대 4배 정도 높아 보일러에서 연료를 버너로 분무시키기 위해 연료와 공기를 잘 혼합하여 적당한 입자크기와 분산특성을 갖게 미립화 시키는데 점도가 높을수

록 미립화가 어렵고 분무일자 걱정이 크게 되므로 이로 인한 불완전 연소와 그을음이 발생한다.

대체로 바이오연료는 질소산화물이 석유계 연료에 비해 많이 배출되는 경향이 있는데 바이오중유의 경우 적게 나오는 이유는 연료 중에 포함된 질소(N)가 적은 것도 있지만, 보일러의 화염 온도가 중유 보다 다소 낮기 때문에 온도에 의해 발생농도가 크게 좌우되는 질소산화물 발생이 줄어든 것으로 보인다. Thermal NO_x는 연소공기 중에 있는 질소와 유리된 산소와의 반응으로 생성되는데 이는 연소실 온도에 크게 의존하는 반응속도와 관련이 있는 것으로 알려져 있다. Thermal NO_x의 생성은 온도가 높고 산소농도가 높을 때, 고온 영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때 많이 생성된다[9]. 이는 중유발전소 실증 연구를 통해서도 보일러내 버너지역의 최대 화염 온도가 다소 낮은 원인으로 질소산화물이 저감되는 것을 확인 한바 있다[6].

또한, 연료중의 황 성분이 낮기 때문에 황산화물도 거의 배출되지 않아 바이오중유 사용으로 인해 유해 배출가스 저감 효과가 클 것으로 판단된다. 따라서 바이오중유를 사용하면 중유와는 달리 배출가스의 환경 규제치 만족을 위한 후처리

Table 8. The trend of emissions reduction

property	unit	Fuel oil (B-C)	Power bio-fuel		
			A	B	C
Dust	mg/Sm ³	9.89	6.94	7.30	6.73
SO ₂	ppm	44.74	0.00	0.00	0.00
NO _x	ppm	244.36	127.37	153.78	162.78
NO	ppm	243.79	124.65	150.59	159.26
CO ₂	ppm	12.51	12.35	12.65	12.41

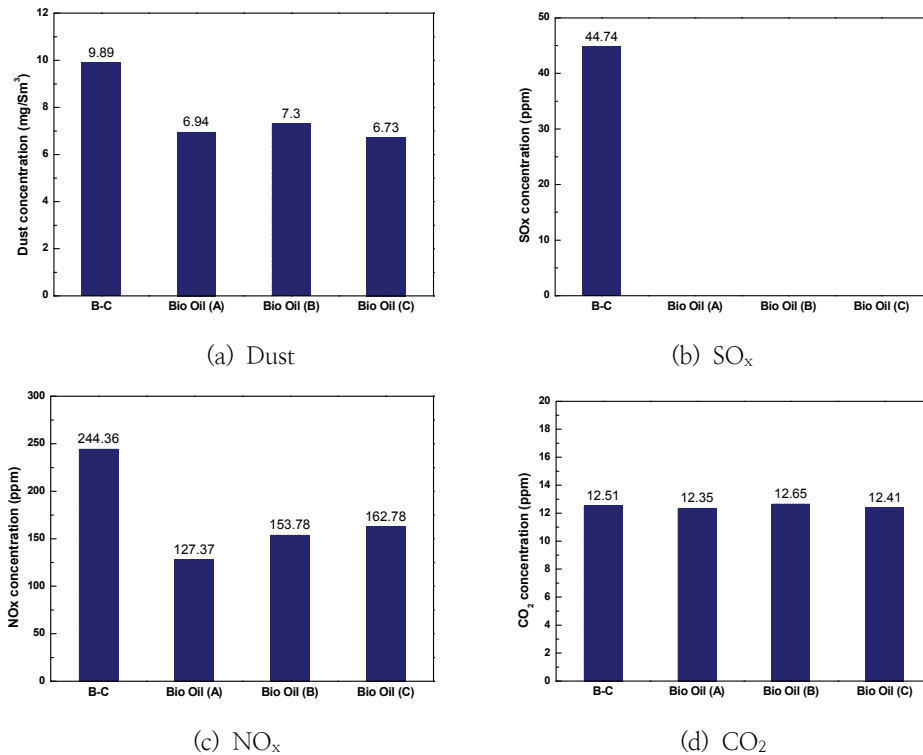


Fig. 5. Emissions reduction trend.

방식의 탈황 및 탈질 설비의 운전을 저감 할 수 있어 이에 따른 경제적인 효과를 거둘 수 있다 [7][10].

먼지와 황산화물 등 배출가스 감소 추이 변화는 Fig. 5에 나타났다.

4. 결론

발전용 바이오중유 시범보급사업의 일환으로 추진하고 있는 본 연구를 통해 일반 중유와 바이오중유의 연료품질 특성 및 산업용 보일러에서의 연소 후 배출되는 먼지, 배출가스의 양을 비교 평가 연구하였다.

1. 연구결과 바이오중유는 석유계 일반 중유보다 인화점, 산가, 요오드가, 산소함량은 대체로 높고, 황분, 잔류탄소분, 동점도, 밀도, 발열량 등은 낮았다. 이 중 낮은 동점도와 잔류탄소분은 연료의 분산특성을 좋

게 하고 코크스 발생을 줄여 배출가스중의 먼지 발생을 감소시키며, 연료중의 낮은 황분은 황산화물 발생을 저감시키는 것으로 보인다.

2. 산업용 보일러를 통한 바이오중유의 배출가스 특성을 평가한 결과 바이오중유를 사용할 경우 먼지는 평균 30%, 질소산화물은 평균 40%까지 감소하였으며, 황산화물은 거의 배출되지 않는 등 유해배출가스가 현저히 감소하는 것이 밝혀졌다. 질소산화물은 연료 자체의 질소가 적은 것과 연소온도에 의해 감소하는 경향을 보이고, 황산화물은 바이오중유에 황분이 거의 없기 때문에 발생하지 않는 것으로 밝혀졌다.
3. 국내 발전사에서 사용하고 있는 바이오중유는 바이오디젤 피치, 팜 오일 및 동물성 유지가 등이 쓰이며 동물성 유지와 바이오디젤 피치는 국내 생산 제품이 주로 활용된다.

때문에 자원이 부족한 국내 사정상 원료물질의 적절한 확보는 무엇보다 중요하다. 따라서 향후 안정된 원료 수급을 통해 적절한 품질의 제품이 공급될 경우 애초 취지와 부합하는 친환경적인 바이오연료 보급이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2014년부터 한국중부발전, 한국서부발전, 한국남부발전, 한국동서발전, 한국지역난방공사 및 한국석유관리원으로 구성된 「발전용 바이오중유 상용화 연구 추진단」의 연구비 지원에 의하여 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Notification on the pilot dissemination projects of bio-fuel oil, Notification No. 2014-1 of the Ministry of Trade, Industry & Energy.
2. J. H. Ha, "Demonstration project of bio-fuel oil in power plant - Current Status and problem", K Petro Magazine, 112, 80-83(2014).
3. E. J. Jang, J. Y. Park, K. I. Min, E. S. Yim, J. H. Ha, B. H. Lee, A Study on the Quality Characteristics of Power Bio-Fuel Oil for Alternative Fuel oil, *J. of Korean Oil Chemists' Soc.* 31, 564-569 (2014).
4. E. J. Jang, M. E. Lee, J. Y. Park, K. I. Min, E. S. Yim, J. H. Ha, B. H. Lee, A Study on the Quality Characteristics of feedstocks for Power Bio-Fuel Oil, *J. of Korean Oil Chemists' Soc.* 32, 137 (2015).
5. Key statistics of the energy industry, *Ministry of Trade, Industry & Energy*, 99 (2014).
6. S. Baek, H. Kim, H. Park, Y. J. Kim, T. Kim and S. H. Ko, The Four Power Plants Field Demonstration Research on Combustion Characteristic of the Bio Oil for Fuel Switching, *J. Korean Soc. Combust.* 20(1) 17-22 (2015).
7. S. Baek, H. Park, Y. J. Kim, T. H. Kim, T. Kim, S. H. Ko, The Demonstration Test Result of 100% Bio Heavy Oil Combustion at the 75 MWe Oil Fired Power Plant, *J. Korean Soc. Combust.* 19(2) 29, 35 (2014).
8. ACEA, AUTO ALLIANCE, CMG, JAMA, World Wide Fuel Charter(2013).
9. K. Lee, J. Lee, B. Son, K. Oh, Control Technique of Nitrogen Oxides from Combustion Fuel Gases, Dongwha Technology (2011).
10. W. G. Lim, J. W. Doe, I. H. Hwang, J. H. Ha, S. S. Lee, CO2 Emission Characteristics of Bunker C Fuel Oil by Sulfur Contents, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment.* 31, 377 (2015).