



바이오중유발전의 대기오염물질 저감효과와 사회적 편익

서형주¹⁾ · 김하나²⁾ · 전의찬³⁾*

Environmental Improvement Effect and Social Benefit: Focusing on Bio-Heavy Oil Power Generation

Hyoungju Seo¹⁾ · Hana Kim²⁾ · Euichan Jeon³⁾*

Received 2 July 2019 Revised 8 August 2019 Accepted 13 August 2019

ABSTRACT The Korean government has announced the ‘3020 Implementation Plan for Renewable Energy’ to increase the renewable energy ratio by 20% by 2030. Recently, bio heavy oil (BHO) has been added as a renewable energy source to help increase the ratio of renewable energy. As an alternative fuel to heavy fuel oil (HFO), BHO is effective in reducing air pollution and greenhouse gas emissions. This environmental improvement effect of BHO has been revealed through previous studies. On the other hand, since previous studies have been conducted for a short period of time or have been pilot experiments, it is necessary to analyze the long term data of the power generations in operation. This study examined the effects of reducing the air pollutants of BHO power generation using the measurement data from Tele-Monitoring System of actual operating BHO and HFO power generations. In addition, the social benefits of environmental improvement effects of BHO power generation were estimated. This study confirmed the reduction effects of BHO power generation compared to HFO power generation for SO_x, NO_x, and PM-2.5, but for TSP, the deviation from the reduction effect was significant depending on the method of operation of the air pollution prevention facilities.

Key words Bio-heavy oil power generation(바이오중유발전), Liquid biofuel(액체 바이오연료), Environmental improvement effect(환경개선효과), Social benefit(사회적 편익), Renewable energy(재생에너지)

Subscript

BHO : bio heavy oil

HFO : heavy fuel oil

NO_x : oxides of nitrogen

PM : particulate matter

PPM : parts per million

SCR : selective catalytic reduction

SO_x : oxides of sulphur

TSP : total suspended particulate

1) Project Leader, Climate Change Services team, ECONETWORK Corp.

2) Associate Professor, Cooperative Course for Climate Change, Sejong University

3) Professor, Department of Environment and Energy, Sejong University

*Corresponding author: cjeon@sejong.ac.kr

Tel: +82-2-3408-4353 Fax: +82-2-3408-4354

1. 서론

신재생에너지원의 개발은 대체 에너지원 확보에 따른 에너지 안보 확립뿐 아니라 기후변화 대응을 위해서도 중요

하다^[1]. 다양한 신재생에너지원 중에서 바이오매스는 연소 시 배출되는 이산화탄소량만큼 광합성으로 고정되기 때문에 탄소 중립적인 에너지원이다^[2]. 최근 우리 정부는 바이오중유를 재생에너지원으로 인정하고 중유의 대체연료로써 2019년부터 국내 중유발전소 모두에 바이오중유를 사용할 수 있도록 「석유 및 석유대체연료 사업법 시행규칙」을 개정한다. 바이오중유란 동물성유지, 바이오디젤 피치 등을 발전용에 맞게 혼합한 액체 바이오연료로 2014년 1월 1일부터 2019년 3월 18일까지 시행된 '발전용 바이오중유 시범보급사업'에 따라 시범보급대상으로 지정된 5개 발전사가 바이오중유를 중유대체연료로 사용해왔다^[3]. 시범보급사업이 지속되면서 시범보급대상 발전사의 바이오중유 소비실적은 2014년 18만kl에서 2017년에는 45만kl로 증가하였으며, 전량 국내 생산으로 인해 21개의 업체가 바이오중유 생산업으로 등록하였다^[4].

바이오중유가 석유 대체연료로 인정받게 된 배경으로 기후변화 대응 측면 외에도 미세먼지 등 대기오염물질 저감효과를 들 수 있다^[5]. 백세현 등(2014), 장은정 등(2014), 하종한 등(2015a)에 따르면 바이오중유는 연료 중 황 함량이 매우 낮아 바이오중유발전 시 황산화물이 전혀 배출 되지 않는다^[6~8]. 바이오연료 연소시 석유계 연료에 비해 질소산화물이 증가하는 경향이 있는데^[9~11], 하종한 등(2015b)의 연구에서는 바이오중유발전 시 질소산화물이 30% 가량 저감되는 것으로 나타났다. 또한 동 연구에서는 바이오중유발전 시 먼지와 입자상물질(PM)이 적게 배출되는 것으로 나타났다^[12].

이처럼 중유발전소 대비 바이오중유발전소의 환경 개선 효과는 기존 연구를 통해 밝혀진 바 있다. 그러나 기존 연구는 오염물질의 농도에만 초점을 두고 있으며, 실험 데이터로 분석을 수행했기 때문에 실제 바이오중유발전소를 운영하는데 발생하는 대기오염물질의 양과는 차이가 있을 수 있다. 또한 실제 운영 중인 바이오중유발전소를 대상으로 장기간에 걸쳐 수행한 연구가 미흡하여 바이오중유발전의 환경영향을 입증하는 데 한계가 있다. 바이오중유의 상용화에 따라 바이오중유의 생산과 소비가 늘어날 것으로 전망되므로 기존 연구의 한계점을 보완하여 바이오중유발전의 환경개선효과를 보다 명확히 규명할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 바이오중유발전의 대기오염물질 저감

효과를 규명하는 것이다. 이를 위해 실제 운영 중인 바이오중유발전소와 중유발전소의 굴뚝원격감시체계(CleanSYS) 수신자료를 수집하여 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 총먼지(TSP)의 농도뿐만 아니라 배출량 측면에서 대기오염물질 저감효과를 비교 분석하였다. 또한, 전구물질의 전환계수를 활용하여 초미세먼지(PM-2.5)의 영향을 분석하였다. 마지막으로 바이오중유발전의 대기오염물질 저감량 분석결과를 바탕으로 사회적 편익을 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 대상

「발전용 바이오중유 시범보급사업 추진에 관한 고시」에서는 한국남부발전, 한국동서발전, 한국중부발전, 한국서부발전 및 한국지역난방공사를 바이오중유 시범보급대상 발전사로 한정하고, 각 사가 보유한 중유발전소 한 호기만을 바이오중유 발전소로 전환 하도록 규정한 바 있다. 본 연구에서는 바이오중유 시범보급사업 대상이었던 A사의 바이오중유발전소 및 중유발전소 한 호기씩을 연구 대상으로 선정하였다. 이때, 외부영향을 최대한 배제하고자, 발전기 용량이 동일하며 내구연한과 설비특성 등이 유사한 발전소를 연구 대상으로 선별하였다. 방지시설의 구성 및 운전 특성은 분석 결과에도 영향을 미치게 되는데, 대기오염물질 측정기기가 방지시설 후단에 설치되어 있기 때문이다.

연구 대상 발전소는 2000년에 중유발전소로 건설되었으며, 2014년에 이중 한 호기의 연료 펌프 교체, 연료 배관 설치 등 설비를 보완함으로써 바이오중유발전소로 전환하였다^[3]. 두 발전소 모두 대기오염물질 방지시설로 먼지를 제거하기 위한 고효율 전기집진기가 설치되어 있으며, 질소산화물을 제거하기 위한 2단 연소설비 및 배연탈질설비(SCR)가 설치되어 있으나, 황산화물을 제거하는 탈황설비는 설치되어있지 않다^[14]. 본 연구 대상 발전소의 기본 사양은 Table 1과 같다¹⁾.

1) 바이오중유에 해당하는 영어 명칭이 부재하다. 본 연구에서는 바이오중유를 Bio heavy oil(BHO)로 명명하고, bunker C유는 heavy fuel oil(HFO)로 한다.

Table 1. Major Specification of Target Power Plant

| Category | BHO | HFO |
|---------------------------------|------|------|
| Year of construction | 2000 | 2000 |
| Power capacity(MW) | 75 | 75 |
| Flue gas desulfurization system | N | N |
| Flue gas denitrification system | Y | Y |
| Electrostatic precipitator | Y | Y |
| BHO mixture ratio(%) | 100 | 0 |

2.2 자료 및 연구 방법

굴뚝원격감시체계는 사업장 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질 배출현황을 원격으로 상시 감시하는 시스템으로 연간 오염물질 발생량이 10톤 이상인 사업장 중 대기환경보전법에 따른 부착기준에 해당하는 시설을 대상으로 하고 있다. 굴뚝원격감시체계로 전송되는 항목은 대기오염물질의 농도, 산소, 온도, 유량, 발전출력이다. 대상 시설에 부착된 자동측정기기의 자료수집기(Data Logger)에서 5분 단위로 자료를 생성하고, 이를 30분 단위 자료로 환산한 뒤 해당 데이터를 관제센터에 실시간 전송한다. 전송된 데이터를 기반으로 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해서 30분 단위 배출가스 유량(Sm^3)과 농도(ppm)에 환산계수를 곱하여 각 오염물질별 배출량을 산정할 수 있다. 관제센터로 전송된 자료를 활용하여 대상시설의 대기오염물질 배출량을 산정하는 방법은 식 (1)과 같다^[15].

$$QC_i = (Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + \dots + Q_n C_n) \times CF \quad (1)$$

여기서, QC_i 는 대상 발전소의 오염물질 i 배출총량(kg/월)을 의미하며, Q 는 오염물질 i 의 농도, 즉, 황산화물 농도(ppm), 질소산화물 농도(ppm), 총먼지(mg/Sm^3)를 의미한다. C_i 는 관제센터로 전송된 30분 단위의 오염물질 i 유량(Sm^3)을 의미하며, CF 는 환산계수로써 황산화물에 $64/22.4 \times 10^{-6}$ 을, 질소산화물에 $46/22.4 \times 10^{-6}$ 을, 총먼지에 10^{-6} 을 적용하면 각각의 배출량을 산정할 수 있다.

본 연구의 분석대상 발전소는 굴뚝원격감시체계 대상 시설로 바이오중유발전소와 중유발전소의 2015년부터 2017년까지 총 36개월간 굴뚝원격감시체계로 전송된 황산화물·질소산화물·총먼지의 농도, 산소, 온도, 유량, 발전출력 데

이터를 수집하였다. 36개월간의 데이터 가운데 자동측정장치의 교체로 인해 실측값이 아닌 대체자료가 포함된 2개월을 분석대상에서 제외 하였다. 또한 바이오중유발전소를 중유발전소로 전환하고, 중유발전소는 바이오중유발전소로 교체한 기간(1개월)은 분석대상에서 제외하여 총 33개월 데이터를 바탕으로 분석하였다. 착화유인 경우 사용량은 설비의 특성을 반영하는 것이므로 경우 사용량을 분석 대상에 포함하였다.

초미세먼지의 경우 별도의 계측 장비가 설치되어 있지 않아, 2차생성계수를 활용하여 배출량을 산정하였다. 환경부(2017)에 따르면, 초미세먼지는 직접배출과 2차생성의 비율이 1:2.5로 2차 생성에서 더 많은 양이 배출된다. 본 연구에서는 환경부(2017)가 제시한 대기오염물질 2차생성계수인 황산화물(0.345), 질소산화물(0.079)을 적용하였다^[16]. 총먼지의 경우 국립환경과학원(2015)의 대기오염물질 배출계수 자료집에 수록된 에너지산업연소의 초미세먼지와 총먼지 평균 비율의 비율을 적용하여 0.7925라는 전환계수를 도출하였다^[17].

3. 연구 결과

3.1 대기오염물질 농도 및 배출량 원단위

3.1.1 대기오염물질 농도

중유발전소와 바이오중유발전소의 황산화물, 질소산화물, 총먼지의 농도 분석결과를 살펴보면 Table 2와 같다. 바이오중유발전의 황산화물 연평균 농도는 8.23ppm으로

Table 2. Emission concentration for BHO and HFO power generations

| Category | | SOx(ppm) | | NOx(ppm) | | TSP(mg/m^3) | |
|---|------|----------|-------|----------|-------|-----------------|------|
| | | HFO | BFO | HFO | BFO | HFO | BFO |
| Year | 2015 | 140.34 | 0.43 | 108.18 | 84.02 | 6.88 | 7.02 |
| | 2016 | 141.27 | 5.74 | 105.25 | 89.36 | 5.51 | 7.60 |
| | 2017 | 138.07 | 18.53 | 109.39 | 97.50 | 5.39 | 3.60 |
| Average | | 139.89 | 8.23 | 107.60 | 90.29 | 5.93 | 6.07 |
| Emission standard of Target power plant | | 180 | | 140 | | 30 | |

중유발전 대비 94% 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 분석대상 발전소의 황산화물 배출허용기준인 180ppm과 비교하면 최대 99.8%까지 낮은 수치이다. 그러나 황산화물이 전혀 배출되지 않는 것으로 분석한 하중환 등(2015a)의 연구 결과와는 다소 차이가 있다. 이는 첫째, 발전소 운전 시 경유를 착화유로 사용함에 따라 경유 연소에 따른 대기 오염물질이 배출된다는 점과 둘째, 바이오중유와 중유 연료 공급배관을 공유하기 때문에 바이오중유 공급 시 공급 배관에 잔여 하는 중유가 비의도적으로 혼소된다는 점에 기인한 것으로 추정된다.

바이오중유발전의 질소산화물 연평균 농도는 90.29ppm으로 중유발전 대비 16% 이상 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 질소산화물이 30% 가량 저감된다는 하중환 등(2015a)의 연구에 비해 다소 낮은 수준인데, 중유발전소에서 배출되는 질소산화물 농도는 방지시설을 추가적으로 가동한 결과이므로 배연탈질설비 진단에서 두 발전소의 질소산화물 농도를 비교한다면 바이오중유발전의 질소산화물 저감효과는 더욱 높게 측정될 것으로 보인다. 또한, 발전소 실제 운전 시 바이오중유와 중유의 연소 온도 차이가 크지 않다는 점을 고려할 때 연소 온도의 영향을 많이 받는 Thermal NOx의 농도를 저감 하는 데 한계가 있을 것으로 보인다^[18].

바이오중유발전소의 총먼지 배출은 6.07mg/m³로 분석대상 발전소의 총먼지 배출허용기준인 30mg/m³에 비해서는 약 80% 낮은 수준이다. 그러나 중유발전소 대비 약 2% 정도 높게 나타났다. 연도별 평균 농도를 살펴보면 2015년과 2016년에는 중유발전소보다 바이오중유발전소의 총먼지 농도가 다소 높게 나타났으나, 2017년의 경우 바이오중유발전소가 33%의 저감효과를 보였다. 이처럼 연도별 편차가 매우 큰 것은 방지시설의 운전조건의 차이에 기인한 것으로 추정된다. 발전소 관계자는 인터뷰에서 2017년부터는 미세먼지관리종합대책 수립 등 미세먼지에 대한 사회적 관심도가 높아지면서 기존 보다 상향된 방식으로 전기 집진기를 운전하고 있음을 밝혔다. 이로 인해 2017년 총먼지 농도 배출 저감효과가 나타나게 된 것으로 추정된다.

3.1.2 대기오염물질 배출량 원단위

대기오염물질의 농도만 분석한 기존연구와 달리 본 연구

에서는 바이오중유와 중유발전소의 황산화물, 질소산화물, 총먼지, 미세먼지(PM-2.5)의 배출량을 비교 분석하였다. 이때 바이오중유발전소와 중유발전소의 발전량이 다르므로 발전량의 차이를 보정하기 위해 월별 대기오염물질 배출량을 월별 발전량으로 나누어 배출량 원단위(kg/MWh)를 구한 후 연평균 원단위를 도출하였다.

중유발전소와 바이오중유발전소의 대기오염물질 배출량 원단위는 Table 3 및 Fig. 1~4와 같다. 바이오중유발전은 중유발전 대비 86.7%~99.7%의 황산화물 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 질소산화물은 바이오중유발전에서 5.5%~23.8%의 저감효과를 보였다. 총먼지의 경우, 바이오중유발전에서 최대 22.2%의 저감효과를 나타냈으나, 저감효과가 미미하거나 오히려 증가하는 것으로 나타난 해도 있었다. 연도별로 편차가 큰 원인은 대기오염물질 농도의 편

Table 3. Emissions per unit of electricity for BHO and HFO power generations

| Category | year | SOx | NOx | TSP | PM-2.5 |
|---|---------|-------|-------|-------|--------|
| HFO power generation (kg/MWh) | 2015 | 1,314 | 0.727 | 0.023 | 0.529 |
| | 2016 | 1,367 | 0.721 | 0.020 | 0.544 |
| | 2017 | 1,264 | 0.711 | 0.018 | 0.506 |
| | average | 1,315 | 0.720 | 0.020 | 0.526 |
| BHO power generation (kg/MWh) | 2015 | 0.004 | 0.554 | 0.022 | 0.063 |
| | 2016 | 0.061 | 0.682 | 0.029 | 0.098 |
| | 2017 | 0.168 | 0.640 | 0.014 | 0.120 |
| | average | 0.078 | 0.625 | 0.022 | 0.093 |
| BHO's Reduction ratio Compare to emissions in HFO power generation(%) | 2015 | 99.7 | 23.8 | 0.9 | 88.1 |
| | 2016 | 95.6 | 5.5 | -45.5 | 82.1 |
| | 2017 | 86.7 | 10.0 | 22.2 | 76.4 |
| | average | 94.1 | 13.1 | -8.0 | 82.3 |

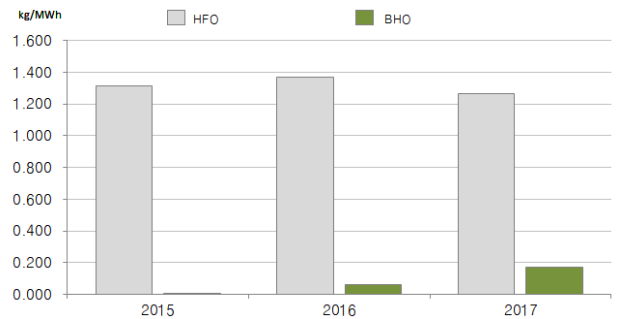


Fig. 1. SOx emissions per unit of electricity for each power generations

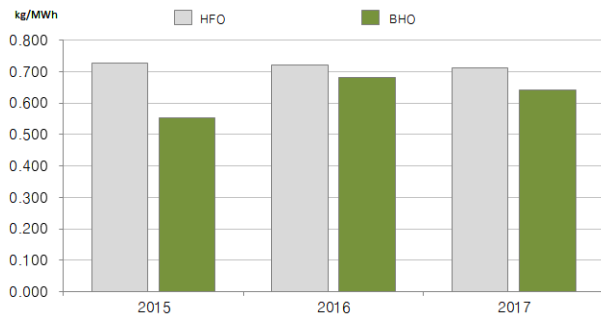


Fig. 2. NOx emissions per unit of electricity for each power generations

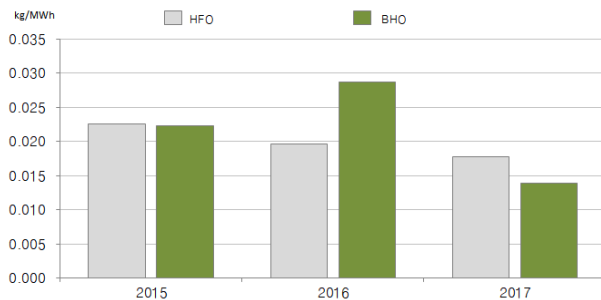


Fig. 3. TSP emissions per unit of electricity for each power generations

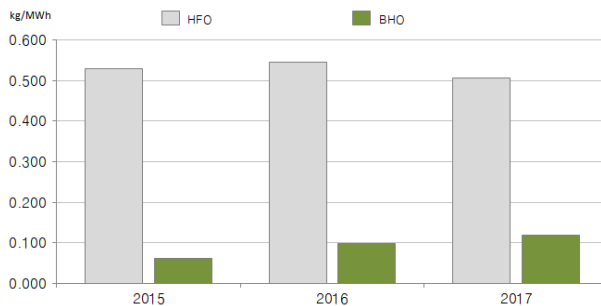


Fig. 4. PM-2.5 emissions per unit of electricity for each power generations

차가 크게 나타난 이유와 같이 2017년부터 상향된 방식의 전기집진기 운전에는 있는 것으로 추정된다. 초미세먼지 배출량 원단위는 바이오중유발전이 중유발전 대비 평균 82.3% 낮게 나타났다. 이는 황산화물의 초미세먼지 2차 생성 기여도가 높기 때문에 바이오중유의 황산화물 저감 정도에 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.

3.2 바이오중유 보급·확대 시나리오

발전량 변동에 따라 바이오중유발전의 대기오염물질 저감량과 발전부문 총 배출량 대비 저감률이 어떻게 달라지는

지 살펴보기 위해 바이오중유의 보급·확대 시나리오를 구성하여 분석을 수행하였다. 바이오중유의 대기오염물질의 배출 저감량을 산출하기 위해 앞서 제시한 중유발전소와 바이오중유발전소의 2017년도 대기오염물질 배출량 원단위(Table 4)에 동일한 발전량을 곱한 후 중유발전소 배출량에서 바이오중유발전소 배출량을 차감하여 바이오중유의 대기오염물질의 배출 저감량을 산출하였다. A사는 초미세먼지 저감을 위해 2017년부터 전기집진시설의 운전모드를 변경하여 발전소를 운영하고 있으므로 2017년의 발전소 운영 조건이 유지될 것으로 가정하고, 2017년도 대기오염물질 배출량 원단위를 배출 저감량 산출에 이용하였다.

바이오중유 보급·확대 시나리오별 용량 및 발전량 기준은 Table 4와 같다. 기준 시나리오는 발전소 이용률, 바이오중유 혼소율, 발전량을 현행 유지하는 상황을 가정한 것으로, 배출 저감량 산출의 기준이 되는 발전량은 2017년 바이오중유발전량인 1,451GWh로 설정하였다^[19]. 시나리오II는 시범보급사업 대상인 5개 발전사가 보유한 중유발전소를 모두 운영하되, 바이오중유 혼소율과 발전소 이용률은 기준 시나리오와 동일하다고 가정한 시나리오로 보급용량과 혼소율을 토대로 산정한 바이오중유발전량은 4,133GWh이다. 시나리오III는 최대 보급 시나리오로 바이오중유 보급 한계치를 고려하여 설정하였는데, 바이오중유 원료 부족량에 대한 국내 통계가 미흡하여 바이오중유 국내 총 생산능력인 2,732천kl을 보급 한계치로 보았다^[20]. 바이오중유발전 대상은 국내 현존 중유발전소 전부(3,320MW)로 설정하였다²⁾. 이를 토대로 시나리오III의 바이오중유발전량을 산정하면 10,144GWh가 되며, 이는 2015년 바이오중유발전과 중유발전으로 공급한 총 유류 발전량의 78%를 바

Table 4. Scenario summary

| Scenario | Number of power generators | Power capacity (MW) | Power generation (GWh) |
|-------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Baseline | 5 | 969 | 1,451 |
| Scenario I | 14 | 3,178 | 4,133 |
| Scenario II | 18 | 3,320.3 | 10,144 |

2) 본 연구에서는 남부발전, 한국동서발전 등 발전공기업이 보유하고 있는 14기의 바이오중유 발전기 뿐 아니라 중유를 연료로 이용하고 있는 민간 발전사의 열병합 발전기 전부를 잠재적인 바이오중유 이용 대상으로 보았다.

이오중유로 보급하는 수준이다.

발전량 시나리오에 따른 바이오중유발전의 대기오염물질 저감량은 Table 5와 같다. 중유발전 대신 바이오중유발전소를 이용해서 1,451GWh의 전력을 생산하면, 황산화물 1,590ton, 질소산화물 103ton, 총먼지 6ton, 초미세먼지 561ton의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 발전량이 4,133 GWh인 시나리오I에서는 황산화물 4,529ton, 질소산화물 294ton, 총먼지 16ton, 초미세먼지 1,599ton의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 발전량 10,144GWh을 생산하는 시나리오II에서는 황산화물 11,116ton, 질소산화물 723ton, 총먼지 40ton, 초미세먼지 3,924ton의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 5. Air pollutants emission reductions in scenarios (unit: ton)

| Scenario | Category | SOx | NOx | TSP | PM-2.5 | |
|-------------|--------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Baseline | emissions | HFO | 1,835 | 1,032 | 26 | 735 |
| | | BHO | 244 | 929 | 20 | 174 |
| | emission reduction | 1,590 | 103 | 6 | 561 | |
| Scenario I | emissions | HFO | 5,226 | 2,940 | 73 | 2,093 |
| | | BHO | 696 | 2,645 | 57 | 495 |
| | emission reduction | 4,529 | 294 | 16 | 1,599 | |
| Scenario II | emissions | HFO | 12,825 | 7,215 | 180 | 5,138 |
| | | BHO | 1,709 | 6,492 | 140 | 1,214 |
| | emission reduction | 11,116 | 723 | 40 | 3,924 | |

중유를 바이오중유로 대체할 경우 발전부문 대기오염물질 배출량 대비 저감률을 분석하면 Table 6과 같다. 발전부문의 2017년 황산화물, 질소산화물, 총먼지의 배출량은 각각 65천ton, 98천ton, 3.3천ton이다^[21]. 초미세먼지의 발전부문 배출량 데이터는 가장 최신 자료인 2015년 자료를 활용하였으며, 배출량은 3.7천ton이다^[22]. 바이오중유발전이 중유발전을 대체할 경우 2015년 발전부문 황산화물

Table 6. Relative size of air pollutants emission reductions based on 2017 emissions in power sector (unit: %)

| Scenario | SOx | NOx | TSP | PM-2.5 |
|-------------|--------|-------|-------|--------|
| Baseline | 2.07% | 0.08% | 0.15% | 1.14% |
| Scenario I | 5.88% | 0.22% | 0.42% | 3.24% |
| Scenario II | 14.44% | 0.54% | 1.04% | 7.95% |

배출량의 2.07%~14.44%까지 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 질소산화물과 총 먼지는 각각 0.08%~0.54%, 0.15%~1.04%의 저감효과가 있으며, 초미세먼지는 1.14%~7.95%를 저감하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

중유발전 대체에 따른 바이오중유발전의 대기오염물질 배출 저감량을 비용으로 환산하기 위해 각 시나리오별 배출 저감량에 대기오염물질별 사회적 비용 단가를 곱하였다. 본 연구에서는 International Monetary Fund, 환경부 등에서 인용하고 있는 사회적 비용 단가 연구들의 평균치를 활용하였다^[23,24]. 황산화물 38,651천 원/ton, 질소산화물 37,371천 원/ton을 적용하였으며, 초미세먼지(PM-2.5)의 경우 두 연구 가운데 Parry et al.(2014)의 값인 52,087천 원/ton을 적용하였다. 김유미(2016)에 수록된 강광규(2015)의 연구에서는 PM-2.5 비용을 단위면적 기준으로 나타낸 것이므로, 발전량 기준으로 비용을 산정하기에 적합하지 않기 때문이다. 총먼지의 경우 그 양이 미미하여 산정대상에서 제외하였다.

사회적 비용 기준의 바이오중유 대기오염물질 저감액 산정 결과는 Table 7에 제시한 바와 같다. 먼저 황산화물은 615억 원~4,296억 원으로 저감효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 질소산화물은 39억 원~270억 원, 초미세먼지는 292억 원~2,044억 원으로 총 946억 원~6,610억 원의 사회적 비용 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 7. Social benefits of reduction in air pollutants emission (unit: 100 million KRW)

| Scenario | SOx | NOx | PM-2.5 | Total |
|-------------|-------|-----|--------|-------|
| Baseline | 615 | 39 | 292 | 946 |
| Scenario I | 1,751 | 110 | 833 | 2,693 |
| Scenario II | 4,296 | 270 | 2,044 | 6,610 |

4. 결론

바이오중유가 석유대체연료와 재생에너지로 인정받고 상용화에 이르게 된 배경에는 바이오중유의 미세먼지 저감 및 온실가스 감축에 대한 기대효과가 크게 영향을 미쳤다^[25]. 때문에 바이오중유가 석유대체연료로서 의미를 갖기 위해서는 기존 중유 대비 환경개선 효과가 있어야 한다. 바이오

중유의 환경영향은 선행 연구를 통해 밝혀진바 있으나, 분석기간이 짧거나 파일럿 발전소를 대상으로 연구를 진행했다는 한계가 있었다. 본 연구는 선행 연구의 한계를 극복하고자 3년간의 바이오중유발전소 및 중유발전소 대기오염물질 측정 데이터를 수집하여 바이오중유발전소의 실제 운영에 따른 환경영향을 규명 하였다.

중유발전과 바이오중유발전의 대기오염물질 배출량 원단위를 분석한 결과, 중유발전 대비 바이오중유발전의 황산화물, 질소산화물 저감효과는 3개년 평균 94.1%, 13.1%로 뚜렷한 감축효과를 보였다. 초미세먼지의 저감효과는 82.3%로 크게 나타났는데, 이는 초미세먼지의 2차 생성 기여도가 높은 황산화물의 저감효과에 따른 결과로 분석된다. 2017년 바이오중유발전량(1,451GWh)을 적용하여 사회적 편익으로 환산하면 총 946억 원에 이르며, 바이오중유 보급 한계치를 고려한 최대 보급 시나리오에서는 사회적 편익이 6,610억 원으로 추정되었다. 총먼지의 경우 방지시설의 운전방식에 따라 편차가 크게 나타났다. 미세먼지에 대한 관심으로 전기집진시설을 상향 가동한 2017년은 바이오중유 감축효과가 최대 22.2%까지 나타났으나, 저감효과가 미미하거나 오히려 증가하는 것으로 나타난 해도 있었다.

분석결과를 종합하여 향후 바이오중유 정책에 시사점을 제공하면 다음과 같다. 발전사는 발전소의 대기오염물질 배출 허용 기준을 준수하는데 그치지 않고 바이오중유발전으로 인한 대기오염물질 배출이 기존 중유발전 대비 낮은 수준으로 배출되도록 발전소 운영에 힘써야 한다. 본 연구를 통해 실제 발전소 운전 시에서도 바이오중유의 황산화물이나 질소산화물 저감효과가 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 그러나 총먼지의 경우 발전소와 방지시설의 운전 조건에 상당한 영향을 받기 때문에 자칫 기존 중유발전보다 더 많은 오염물질을 배출할 가능성이 있다. 따라서 발전사 스스로 강화된 관리 기준을 설정하여 중유 대비 낮은 오염물질을 배출하도록 운영한다면, 바이오중유의 보급이 ‘재생에너지 3020 이행계획’의 수치적 목표 달성을 넘어 대기오염물질과 온실가스 저감에 실질적인 기여를 할 수 있을 것이다^[26].

본 연구는 상용발전소의 굴뚝원격감시체계에 전송된 3년간의 자료를 수집·분석함으로써 선행연구 대비 자료의

양과 질에 대한 신뢰도를 높이고자 하였으며, 환경영향을 저감 비용으로 환산함으로써 연구 결과의 활용도를 높였는데 그 의의가 있다. 그러나 대기오염물질 배출은 발전소의 설비 특성, 보일러 및 방지시설 운전 방식 등에 영향을 많이 받기 때문에 본 연구의 분석 결과가 바이오중유발전의 일반적인 대기오염물질 배출 저감효과를 나타낸다고 단정 짓기는 어렵다. 또한, 초미세먼지는 직접배출량을 고려하지 않았으므로 과소 추정의 우려가 있다. 대기오염이 국민 건강을 위협하고 삶의 질을 저하하는 주요 원인으로 인식되는 상황에서 향후 분석대상의 범위를 확대하고 방지시설 등의 운전 조건을 고려해서 바이오중유발전의 대기오염 영향을 보다 명확히 규명할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 환경부 기후변화특성화대학원 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Lee, J.S., 2010, “Legislative review of FIT and RPS”, Korea Legislation Research Institute, Green Growth Research, No.10-16-4.
- [2] Choi, Y.S., Choi, S.K, Kim, S.J., Han, S.Y., and Jeong, Y.W., 2017, “Effect of biomass particle size on the fast pyrolysis characteristics of palm kernel shell to produce biocrude-oil”, New. Renew. Energy, 13(4), 55-63.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea, 2018, “Public notice on pilot project for BHO for power generation”, No.2018-234.
- [4] Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 2018, “Final evaluation of research for biofuel commercialization for power generation”, 4 April 2018.
- [5] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, “Full supply of BHO for power generation as an alternative fuel for petroleum”, press release.
- [6] Baek, S.H., Kim, H.H., Park, H.Y., Kim, Y.J., Kim, T.H., and KO, S.H., 2015, “The four power plants field

- demonstration research on combustion characteristic of the bio oil for fuel switching”, J. Korean Soc. Combust., 20(1), 15-23.
- [7] Jang, E.J., Park, J.Y., Min, K.I., Yim, E.S., Ha J.H., and Lee, B.H., 2014, “A study on the quality characteristic of power bio-fuel oil for alternative fuel oil”, J. Korean Oil Chem. Soc., 31(4), 562-571.
- [8] Ha J.H., Jang, E.J., and Kwon, Y.C., 2015a, “A study on the performance evaluation and quality for power bio-fuel oil”, J. of Korean Oil Chemists' Soc., 32(3), 588-598.
- [9] Hoekman, K.S., and Robbins, C., 2012, “Review of the effects of biodiesel on NOx emissions”, Fuel Processing Technology, 96, 237-249.
- [10] Varatharajan K., and Cheralathan M., 2012, “Influence of fuel properties and composition on NOx emissions from biodiesel powered diesel engines: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 3702-3710.
- [11] Palash, S.M., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Masum, B.M, Rizwanul Fattah, I.M., and Mofijur, M., “Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 473-490.
- [12] Ha J.H., Jeon C.H., and Kwon Y.C., 2015b, “A Study on the emission characteristics for blended power bio-fuel oil”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 26(5), 484-492.
- [13] Kim, B.W., 2014, “Korea Midland Power Co. Ltd. to launch a demonstration of BHO”, TODAY ENERGY, <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=93506>.
- [14] Korea Midland Power Co. Ltd., 2004, “Jeju power plant TMS Operation Case”.
- [15] Ministry of Environment, Korea Environment Corporation, “Continuous emission monitoring system”, <https://www.stacknsky.or.kr>.
- [16] Ministry of Environment, 2017, “Annual Report of Air Quality in Korea 2016”.
- [17] National Institute of Environmental Research, 2015, “Air pollutants emission factors”.
- [18] Korea Environment Corporation, 2003, “Understanding the low-NOx burner and analyzing the installation effects”.
- [19] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, “Full supply of BHO for power generation as an alternative fuel for petroleum”, press release.
- [20] Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 2018, “Final evaluation of research for BHO commercialization for power generation”.
- [21] Ministry of Environment, 2018, “635 business sites including power plants, air pollutants emissions of 360,000 tons per year”. press release.
- [22] Ministry of Environment, 2017, “Analysis of causes of particulate matter in 2014”.
- [23] Parry, I., Heine, D., Lis, E., and Li, S., 2014, “Getting energy prices right: From principle to practice”, International Monetary Fund, Washington, D.C.
- [24] Kim, Y.M., 2016, “Environmental benefits and cost analysis of environmental impact assessment consultation project”, Korea Environment Institute.
- [25] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, “Full supply of BHO for power generation as an alternative fuel for petroleum”, press release.
- [26] Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea, 2017, “3020 Implementation plan for renewable Energy”.