

Short Communication



CrossMark

Open Access

영농부산물 소각에서 발생하는 가스상 오염물질의 배출계수 개발 -맥류를 중심으로-

김민욱^{1†}, 노준영^{2†}, 우지윤³, 이동은², 홍성창¹, 김승진^{2*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과, ²(주)휴엔리克斯 첨단기술연구소, ³세종대학교 기후환경융합센터

Development of Gaseous Pollutant Emission Factor by Incineration of Barley & Wheat among Agricultural Residues

Min-Wook Kim^{1†}, Joon-Young Roh^{2†}, Ji-Yun Woo³, Dong-Eun Lee², Hong-Sung Chang¹ and Seung-Jin Kim^{2*} (¹Clim-ate Change & Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Advanced Technology Research Institute, Huenrix, Seoul 08501, Korea, ³Climate and Environment Convergence Center, Sejong University, Seoul 05006, Korea)

Received: 05 December 2023/ Revised: 18 December 2023/ Accepted: 21 December 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Min-Wook Kim
<https://orcid.org/0000-0001-8262-5909>

Joon-Young Roh
<https://orcid.org/0000-0002-3066-3230>

Ji-Yun Woo
<https://orcid.org/0000-0002-9376-0206>

Dong-Eun Lee
<https://orcid.org/0009-0005-5886-6549>

Sung-Chang Hong
<https://orcid.org/0000-0002-9042-1284>

Seung-Jin Kim
<https://orcid.org/0009-0003-6558-2902>

Abstract

The current study involved the calculation of air pollutant emission factors (EFs) generated from the incineration of agricultural residues. The process included sample collection, weight measurement, moisture measurement, incineration system configuration, and concentration measurement. The average CO emission factor of gaseous air pollutants from the incineration of barley and wheat agricultural residues was calculated as 0.08289 kg/kg and 0.06665 kg/kg, respectively, whereas the average NO_x emission factor for barley and wheat agricultural residues was determined to be 0.00518 kg/kg and 0.00185 kg/kg,

respectively. In the existing air pollutant emission calculation manual, the EF is presented only for barley. Therefore, in this study, we have introduced the EF for wheat, previously absent in the calculation manual. Additionally, the air pollutant calculation manual presents the EF of air pollutants as one value, but in this study, EF values corresponding to 2.5% and 97.5% were presented in consideration of the distribution of experimental values as shown in EMEP/EEA data.

Key words: Agricultural residues, Air pollution, Emission factor, Gaseous air pollutants

[†]These authors contributed equally to this work.

* Corresponding author: Seung-Jin Kim

Phone: +82-70-5118-9905; Fax: +82-70-8230-3900;

E-mail: huenrix@naver.com

서 론

산불, 영농 부산물 연소, 가정용 바이오연료 연소 등을 포함하는 바이오매스 연소는 다양한 가스상 및 입자상 물질을 대기로 배출한다[1-3].

영농부산물은 생물성 부산물인 고춧대, 벚잎, 과수의 가지 등을 말하며, 퇴비로 재활용되거나 연료소각 또는 단순 소각 등으로 처리된다[4]. 생물성 연소 중 영농부산물 소각은 이러한 잔재물 소각 시 배출되는 대기오염물질의 배출량을 산정하는 부문이다(환경부, 2022).

영농부산물 소각 중분류에서는 과수, 두류, 잡곡 등 7개 소분류로 구분하고 있으며, 단위 면적당 작물 소각량과 작물에 대한 오염물질의 배출계수를 고려하여 대기오염물질 배출량을 산정하고 있다. 본 연구 대상인 맥류는 보리만을 대상으로 CO, NO_x, TSP, PM-10 등에 대한 대기오염물질 배출계수를 제시하고 있다.

영농부산물 소각에 의해 발생한 대기오염물질 발생은 노지에서 별도의 처리 없이 배출되기 때문에 배출량을 관리하기 힘들 뿐 아니라, 직접적으로 주변 지역에 많은 영향을 끼치며, NO_x , SO_x 와 같은 가스상 대기오염물질은 초미세먼지 생성에 관여하기 때문에 관리가 필요하다[5-7].

또한, 노지에서 영농부산물 소각 시 영농부산물들의 연소 조건은 계절, 영농부산물의 수분함량 등에 따라 달라지며, 작물별로도 대기오염물질 배출량의 특성이 달라질 수 있다. 이러한 작물과 연소 조건에 따라 대기오염물질 배출 특성에 관한 연구를 통한 배출개수 개발이 필요하다[8].

본 연구에서는 영농부산물 중 맥류 소각에 따른 가스상 대기오염물질 배출계수 개발을 위해 EPA-600과 R-96-128을 참고하여 실험시스템을 구축하고, 보리와 밀을 대상으로 공정시험법에 따라 가스상 오염물질의 농도를 측정하고 배출계수를 개발하였다.

재료 및 방법

시료 수집 및 무게 · 수분량 측정

대상 시료의 수집은 맥류 생산량이 가장 많은 전라북도 및 전라남도에서 시료를 수집하였다. 대표성을 가질 수 있도록 형태변형이 없고 일반적인 조건에서의 작물을 수집하였고, 시료 수집 시기는 『농사로』에서 제시하고 있는 각 작물의 농작업일정 및 표준재배법 자료를 참고하여 Fig. 1과 같이 수확 적기 시기 후인 6~7월에 작물시료를 수집하였다.

배출계수 개발을 위한 영농부산물 시료의 무게는 충분한 소각시간을 확보하기 위하여 사전 실험을 진행하였고, 실험 1 회당 소각량을 1 kg으로 설정하였다.

수분량 측정은 Kern사의 High-Standard Moisture Analyzer(Germany)를 이용하여 소수점 첫째자리까지 측정하였다.

신뢰도 높은 수분량 측정을 위해 시료에서 균등한 범위로 3부분 이상에서 채집하여 평균 수분량 측정하였으며, Fig. 2와 같이 노지 방치, 공동집하장 보관 후 소각 등 현장 특성을 최대한 반영하여 수분량을 측정하였다.

소각 시스템 장치 구성

소각실험 시스템은 EPA method 5G (Determination of particulate matter emissions from wood heaters (dilution tunnel sampling location)와 EPA-600/R-96-128 (Evaluation of Emission from the Open Burning of Land-Clearing Debris) 등을 참고하여 구축하였으며, 소각 시스템 장치 구성의 고려 사항 조건은 Table 1와 같다.

소각 시스템은 연소동, 측정동, 처리동으로 구성하였으며, 연소동과 측정동을 분리하여 실험자의 안전을 확보하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 측정동에는 실험 장치의 전원 시스템, 유량 조절 장치 등을 구성하여 실험에 대한 통합제어시스템을 구성하였으며, 처리동에는 전기집진장치(EP, Electrostatic Pre-

Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
					Manure	Maturity period					
	Seedling stage								Sample collection		
Sowing							Harvest				

Fig. 1. Collection time of barley and wheat sample.



Fig. 2. Moisture measurement procedure.

Table 1. Conditions for incineration system considerations

Classification	Conditions
Combustion chamber size	Floor area 2.7 x 3.4 m, Height 1.9-2.2 m
Flow rate	43.6-45.5 m ³ /min
Effective air exchange rate	2.3-2.4 /min
Combustion furnace	910 x 460 x 410 mm; Fireproof bricks are used inside the combustion furnace
	The deflector shield is installed 0.9 to 1.2 m above the combustion furnace
Internal conditions	To provide cleanliness and inert conditions inside the combustion chamber, all internal surfaces are covered with Tedlar sheets (approximately 0.06 mm thick) and sealed with HVAC grade aluminum tape

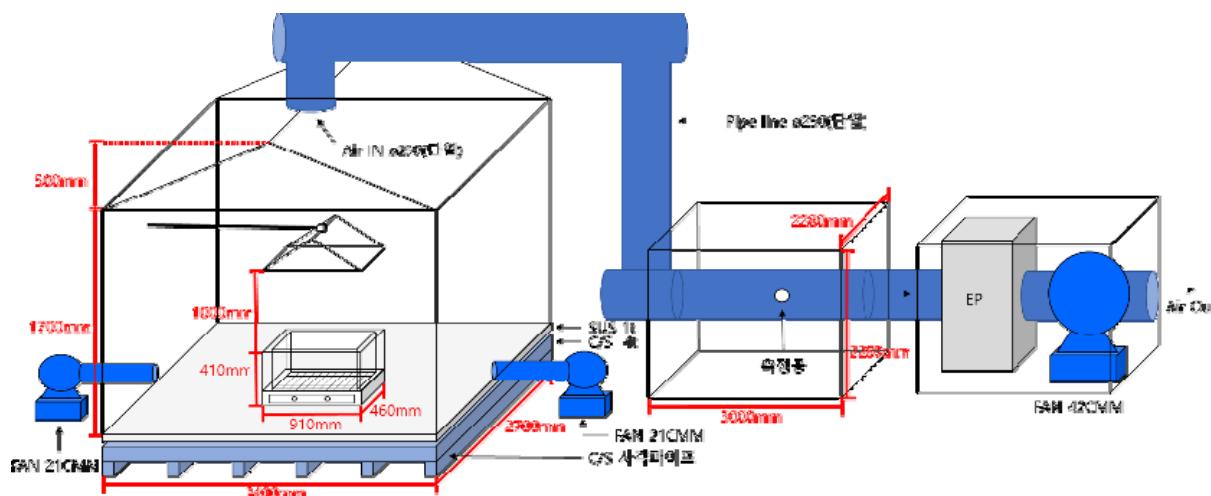


Fig. 3. Schematic diagram of incineration system.

cipitator)를 구성하여 소각 실험에서 나오는 대기오염물질 배출로 인한 주변 대기오염과 민원을 고려하여 실험을 진행하였다.

실험 조건 및 농도 측정

소각 시 배출가스의 유량 및 온·습도 측정은 실시간 측정기를 활용하여 측정하였으며, 측정위치는 배기관의 굴곡 부분이나 단면 모양이 급격하게 변하는 부분을 피하여 배출가스의 흐름이 안정되고 측정작업이 쉽고 안전한 곳을 선정하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 유량 및 온·습도 측정기는 KIMO

사의 CP Class 201 측정기를 이용하였다.

농업부산물 소각 시 가스상 오염물질 측정은 공정시험법을 준수하였다. 공정시험법에서는 가스상 오염물질의 측정 방법으로 전기화학식(정전위 전해법), 적외선 흡수법, 자외선 분광법 등을 제시하고 있으며, 본 연구에서는 공정시험법에 따라 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NO_x)의 연속측정법으로는 비분산형 적외선분석(NDIR, Non-Dispersive Infrared)법을 이용하였다[9,10]. KOLAS 기관에 측정 장비의 농도 측정 교정을 의뢰하고 교정성적서를 발행하여 측정 농도의 신뢰성을 확보하였다.



Fig. 4. Flow/temperature/humidity measuring equipment.



배출계수 산정식

영농부산물 소각 시의 배출계수는 소각시간동안의 가스상 오염물질의 농도, 배출가스의 유량, 농업잔재물 소각량 값을 이용하여 다음 식 (1)을 이용하여 산정하였다[11,12].

$$\text{입자상 오염물질 배출계수} (BP_c) = \frac{B_c \times V_c}{W_c} \quad (1)$$

여기에서,

BP_c : 가스상 오염물질의 배출계수(kg/kg)

B_c : 가스상 오염물질의 농도(mg/m³)

V_c : 가스상 오염물질 측정시의 유량(m³)

W_c : 실험에서 사용된 농업부산물의 무게(kg)

결과 및 고찰

실험 조건 및 농도 측정 결과

보리 영농부산물 소각 시 가스상 대기오염물질 배출계수 개발을 위하여 실험을 10회 진행하였으며, Table 2에서 보는 바와 같이 각 실험 조건의 평균 배출유량은 25.51 m³/min, 평균 소각시간은 18분, 시료의 평균 수분 함량은 18.75%으로 나타났다.

밀 영농부산물 소각 시 가스상 대기오염물질 배출계수 개발을 위하여 실험을 10회 진행하였으며, Table 3에서 보는 바와 같이 각 실험 조건의 평균 배출유량은 25.97 m³/min, 평균 소각시간은 16분, 시료의 평균 수분 함량은 15.23%으로 나타났다.

보리 소각 시 발생하는 CO와 NO_x의 농도 측정 결과는

Table 2. Experimental conditions for barley incineration

Classification	No.	Flow rate (m ³ /min)	Incineration time (min)	Moisture Rate (%)	Incineration amount (kg)
Barley	1	26.42	20	40.70	1
	2	26.38	17	38.90	1
	3	26.72	14	29.60	1
	4	26.33	20	14.10	1
	5	27.48	20	12.30	1
	6	27.02	10	9.03	1
	7	25.98	22	9.03	1
	8	23.75	28	8.93	1
	9	23.09	15	14.17	1
	10	21.92	15	10.77	1
Mean		25.51	18	18.75	1
SD		1.79	4.8	12.00	-

Table 3. Experimental conditions for wheat incineration

Classification	No.	Flow rate (m ³ /min)	Incineration time (min)	Moisture Rate (%)	Incineration amount (kg)
Wheat	1	25.97	18	18.73	1
	2	27.15	19	13.67	1
	3	26.97	20	13.83	1
	4	26.09	15	10.33	1
	5	21.13	18	24.93	1
	6	20.86	14	16.23	1
	7	20.63	14	15.93	1
	8	20.43	17	14.60	1
	9	20.72	12	13.87	1
	10	20.23	11	10.13	1
Mean		23.02	16	15.23	1
SD		2.91	2.9	4.06	-

Table 4에 나타내었다. CO의 평균 농도는 199.29 mg/m^3 , 표준편차는 95.93 mg/m^3 으로 나타났으며, NO_x 의 평균 농도는 12.14 mg/m^3 , 표준편차는 8.49 mg/m^3 으로 나타났다.

밀 소각 시 발생하는 CO와 NO_x 의 농도 측정 결과는 Table 5에 나타내었다. CO의 평균 농도는 187.17 mg/m^3 , 표준편차는 29.82 mg/m^3 으로 나타났으며, NO_x 의 평균 농도는 5.25 mg/m^3 , 표준편차는 1.96 mg/m^3 으로 나타났다.

배출계수 산정 결과

본 연구에서 산정한 맥류 소각 시 가스상 대기오염물질 배출계수 산정 결과, Table 6에서 보는 바와 같이 보리 소각 시 CO의 평균 배출계수는 0.0829 kg/kg 으로 나타났으며, 2.5%에 해당하는 값은 0.0323 kg/kg , 97.5%에 해당하는 경우 0.1104 kg/kg 으로 나타났다. NO_x 배출계수의 경우, 평균 0.0052 kg/kg 으로 나타났으며, 2.5%에 해당하는 값은 0.0014 kg/kg , 97.5%에 해당하는 경우 0.0100 kg/kg 으로 나타났다.

밀 소각 시 CO의 평균 배출계수는 0.0667 kg/kg 으로 나

타났으며, 2.5%에 해당하는 값은 0.0339 kg/kg , 97.5%에 해당하는 경우 0.0862 kg/kg 으로 나타났다. NO_x 배출계수의 경우, 평균 0.0019 kg/kg 으로 나타났으며, 2.5%에 해당하는 값은 0.0004 kg/kg , 97.5%에 해당하는 경우 0.0031 kg/kg 으로 나타났다.

EMEP/EEA 배출계수와 비교 결과, 평균 배출계수 결과는 유사하게 나타났으며 2.5%와 97.5%에 해당하는 값은 다소 차이를 나타냈다[12].

본 연구에서는 시료 수집, 소각 실험, 가스상 대기오염물질 농도 분석 등을 통하여 맥류 영농부산물 소각에 따른 배출계수를 산정하였다. 맥류 영농부산물 소각에 따른 배출계수는 보리와 밀을 대상으로 실험을 진행하였으며, 각 총 10개의 실험을 통해 배출계수를 산정하였다.

맥류 영농부산물 소각에 따른 배출계수 산정 결과, 보리 영농부산물 소각에 따른 가스상 대기오염물질 CO 평균 배출계수는 0.08289 kg/kg 으로 나타났으며, NO_x 평균 배출계수는 0.00518 kg/kg 으로 나타났다. 밀 영농부산물 소각에 따른 가

Table 4. Results of barley incineration experiment concentration measurement

Classification	No.	CO (mg/m^3)	NO_x (mg/m^3)
Barley	1	164.76	21.20
	2	219.33	10.08
	3	285.85	27.99
	4	157.92	14.28
	5	170.67	11.15
	6	441.01	21.17
	7	110.73	1.56
	8	85.43	1.95
	9	165.99	4.53
	10	191.24	7.48
Mean		199.29	12.14
SD		95.93	8.49

Table 5. Results of wheat incineration experiment concentration measurement

Classification	No.	CO (mg/m^3)	NO_x (mg/m^3)
Wheat	1	162.26	2.8
	2	154.25	4.21
	3	156.45	2.73
	4	216.48	9.33
	5	162.62	4.55
	6	197.58	7.91
	7	204.28	5.37
	8	159.02	5.73
	9	233.07	5.39
	10	225.68	4.49
Mean		187.17	5.25
SD		29.82	1.96

Table 6. Comparison with EMEP/EEA emissions factors

Classification		Mean	2.5%	97.5%
		This study(kg/kg)		
Barley	CO	0.0829	0.0323	0.1104
	NO_x	0.0052	0.0014	0.0100
Wheat	CO	0.0667	0.0339	0.0862
	NO_x	0.0019	0.0004	0.0031
EMEP/EEA(kg/kg)				
Barley	CO	0.0987	0.0952	0.1022
	NO_x	0.0027	0.0026	0.0029
Wheat	CO	0.0667	0.0381	0.0953
	NO_x	0.0023	0.0018	0.0029

스상 대기오염물질 배출계수 산정 결과, CO 평균 배출계수는 0.06665 kg/kg으로 나타났으며, NO_x 평균 배출계수는 0.00185 kg/kg으로 나타났다.

EMEP/EEA 보고서에서 제시하고 있는 배출계수와 비교 결과, 보리와 밀의 평균 배출계수는 큰 차이를 나타내지 않았다. 2.5%와 97.5%에 해당하는 배출계수 값들의 차이는 다소 차이를 보였으며, 이는 각 배출계수 산정의 실험의 횟수, 수분량, 연소 조건 차이 등으로 인해 분포의 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 맥류인 보리와 밀을 대상으로 영농부산물 소각 시 발생하는 가스상 대기오염물질의 배출계수를 산정하였다. 기존 대기오염물질 배출량 산정 편람에서는 보리만을 대상으로 배출계수를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 산정 편람에서 제시하고 있지 않은 밀을 대상으로 배출계수를 제시하였다.

또한, 대기오염물질 산정편람에서는 대기오염물질의 배출 계수를 하나의 값으로 제시하고 있지만, 본 연구에서는 EMEP/EEA 자료와 같이 실험값들의 분포를 고려하여 2.5%와 97.5%에 해당하는 배출계수 값을 제시하였다.

이와 같이 연소 조건, 시료의 수분함량 조건에 따라 배출계수를 산정하고, 그에 따른 분포를 고려하여 EMEP/EEA와 같이 2.5%와 97.5%에 해당하는 배출계수도 함께 제시한다면 영농부산물 소각 시 발생하는 대기오염물질 배출량을 보다 신뢰성 있게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Development of particulate matter emission characteristics and emission factor by incineration of agricultural by-products (Project No. RS-2022-RD010226)", National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Climate Change Assessment Division, Republic of Korea.

References

- Yanyan Z, Daniel O, Barbara Z, AlanG (2013) Particulate emissions from different types of biomass burning. *Atmospheric Environment*, 72, 27-35.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.026>.
- Christoph S, Markus L, Emmanuel P, Leopold L, Magdalena R, Carlos R, Markus H, Ge Pe, Heidi B, Hans P (2011) Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. *Atmospheric Environment*, 45, 7443-7454. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.006>.
- Andreae M, Merlet P (2001) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 955-966.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001382>.
- Park WK, Park NB, Shin JD, Hong SG, Kwon SI (2011) Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector. *Korean Journal of Environment Agriculture*, 30(3), 252-260.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2011.30.3.252>.
- Chang SS, Lee WJ, Holsen TM, Li HW, Wang LC, Chang-Chien GP (2014) Emission of polychlorinated-p-dibenzodioxin, dibenzofurans (PCDD/Fs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) from rice straw biomass burning. *Atmospheric Environment*, 94, 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.067>.
- Black RR, Meyer CP, Touati A, Gullett BK, Fiedler H, Mueller JF (2012) Emission factors for PCDD/PCDF and dl-PCB from open burning of biomass. *Environment International*, 38(1), 62-66.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.07.003>.
- Kang S, Woo J, Jeon EC (2020) Ammonia emission characteristics and emission factor of municipal solid waste incineration plant. *Sustainability*, 12(18), 7309.
<https://doi.org/10.3390/su12187309>.
- Park SK, Hong YS, Kim D, Kim DY, Jang YK (2015) Emission of air pollutants from agricultural crop residues burning. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 63-71.
<https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.1.063>.
- Kim JH, Lee CJ (2017) Three - Harmful gas detection sensor module using non-dispersive infrared (NDIR) technology. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 42(8), 1591-1598. <https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.8.1591>.
- Jang KW, Heo SH, Lim SY, Kim DG, Jung YW, Kang DI (2017) A study on the characteristics of solid-fuel combustion. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 351-360.
<https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.351>
- Simon SA, João AC, Mario AM, Cleverson P (2016) Particulate matter emission factors for biomass combustion. *atmosphere*, 7(11), 141.
<https://doi.org/10.3390/atmos7110141>.
- Kim DY, Choi M, Han YH, Park SK (2016) A study on estimation of air pollutants emission from agricultural waste burning. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 167-175.
<https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.2.167>