

## 농업잔재물 소각에 의한 대기오염물질의 배출 특성

### Emission of Air Pollutants from Agricultural Crop Residues Burning

박성규 · 홍영실 · 김대근<sup>1),\*</sup> · 김동영<sup>2)</sup> · 장영기<sup>3)</sup>

(주)케이에프 코퍼스트 R&D센터, <sup>1)</sup>서울과학기술대학교 환경공학과

<sup>2)</sup>경기개발연구원 환경연구실, <sup>3)</sup>수원대학교 환경에너지공학과

(2014년 9월 23일 접수, 2015년 2월 5일 수정, 2015년 2월 11일 채택)

Seong-Kyu Park, Young-Shil Hong, Daekeun Kim<sup>1),\*</sup>

Dong Young Kim<sup>2)</sup> and Young Kee Jang<sup>3)</sup>

KOFIRST R&D Center, KF Co. Ltd.

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University  
of Science and Technology

<sup>2)</sup>Department of Environment, Gyeonggi Research Institute

<sup>3)</sup>Department of Environment Energy Engineering, The University of Suwon

(Received 23 September 2014, revised 5 February 2015, accepted 11 February 2015)

### Abstract

The gaseous and particulate emissions from agricultural crop residues burning were investigated. The test residues included white soybean stem, pepper stem, apple branch, peach branch, pear branch, grape branch, sesame stem, perilla stem, and barley stem. Particulate emissions were dominated by fine particles ( $<0.1 \mu\text{m}$  in size). The highest  $\text{PM}_{2.5}$  Emission factors were from barley stems (35.2 g/kg), and the lowest from pepper stems (7.9 g/kg). Emission factors for CO, NO, and VOCs were 146~305 g/kg, 4.94~15.02 g/kg, 27.4~353.3 g/kg, respectively. Benzene played an important role in VOCs emissions from biomass burning.

**Key words :** Biomass burning, Field burning, Agriculture residue, Emission factor

### 1. 서 론

생물성연소(biomass burning)는 인간 활동 또는 자연현상에 의하여 생체(biomass)가 연소되는 것을 의

미하며, 농업잔재물의 연소와 산불 등의 식생(vegetation)에 의한 것이 대부분을 차지한다. 이 생물성연소는 전 지구적으로 약 90%가 인간의 활동이 직접적인 원인이라고 한다(Koppmann *et al.*, 2005). 국내에서는 생물성연소 배출량의 관리적인 측면에서 일상생활 주변에서 흔히 확인할 수 있는 생활폐기물 등에 의한 노천소각과 나무 또는 과수가지 등을 주로 연료로 쓰는 아궁이 또는 화목난로, 펠릿난로, 숯

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-970-6606, E-mail : kimd@seoultech.ac.kr

제조, 고기구이까지 포함하여 분류하고 있다(NIER, 2014; GRI, 2011).

생물성연소는 다양한 입자상, 가스상의 대기오염물질을 배출할 뿐만 아니라 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 블랙카본 등 기후변화 원인물질도 다량으로 배출하여 지구온난화의 중요한 원인이 되고 있다. 국내의 선행 연구에서도 생물성연소에 의한 먼지와 블랙카본의 배출량에 대한 심각성을 보고하고 있다(Lee *et al.*, 2009a, b; Hwang *et al.*, 2008). 일반적으로 생물성연소는 적절한 관리가 이루어지지 않기 때문에 불완전연소가 수반되면서 대기오염물질이 다량으로 배출되고, 다이옥신 등의 유해물질이 동시에 발생할 가능성이 높다고 한다(Chang *et al.*, 2014; Black *et al.*, 2012). 생물성연소는 생활주변에서 행해지는 경우가 많으며, 연소에 의해 발생된 대기오염물질은 인간에

게 직접적으로 피해를 끼치게 된다. 특히, 농촌지역의 경우 농작물 수확 후 발생된 각종 농업잔재물이 노천소각으로 처리되고 있다. 농업잔재물은 각종 생활폐기물과 혼합되어 연소되기도 하며, 혼합비율, 소각량, 함수율, 연소 환경 등이 매우 다양하여 농업잔재물에 의한 대기오염물질의 배출특성을 파악하기가 어렵다.

생물성연소와 관련한 국내 연구로는 미국 배출계수를 사용하여 여러 가지 배출원에 대한 배출량을 추정한 연구(GRI, 2011)는 있으나, 국내와 연소 형태 및 식생 특성, 기후 등 여러 요인이 다르기 때문에 직접적으로 활용하기에는 어렵다. 또한, 생활폐기물 노천소각으로부터 발생하는 대기오염물질의 배출계수 산정에 관한 연구(Kim *et al.*, 2009)는 확인되지만, 농업잔재물의 노천소각에 따른 배출계수에 대한



Fig. 1. Test samples of agricultural crop residues.

연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 농업잔재물의 노천소각에 의한 대기오염물질의 배출특성을 파악하기 위하여 대표적인 9종의 농업잔재물을 대상으로 실시하였다. 실험은 연소모형 챔버에서 진행하였으며, 입자상 및 가스상 대기오염물질의 배출특성을 분석하고, 대기오염물질별 배출계수를 도출하였다.

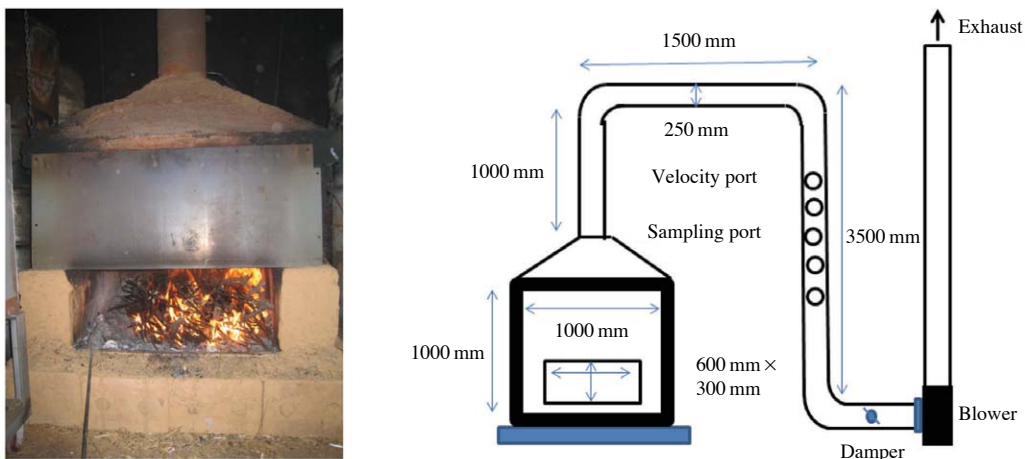
## 2. 연구 내용 및 방법

## 2.1 대상 시료와 연소 실험

농업잔재물 노천소각에 의한 대기오염물질의 배출 특성을 파악하기 위한 시료는 설문조사와 현장 방문 조사(Park *et al.*, 2012)를 통하여 노천소각 품목을 선정하였으며, 대상 시료는 봄철, 여름철, 가을철에 수확하고 잔재물로 남는 보리대, 흰콩대, 참깨대, 들깨대, 고추대, 그리고 늦겨울 또는 이른 봄철 과수나무 가지치기의 잔재물로 사과나무, 포도나무, 복숭아나무, 배나무 가지로 선정하였다. 대상으로 한 농업잔재물의 시료는 원칙적으로 노천에서 소각하는 형태를 최대한 반영하기 위하여 보리대, 흰콩대, 참깨대, 들깨대, 고추대는 수집한 크기 그대로 연소 모형 챔버에 투입하여 연소 실험에 사용하였으며, 과수가지는 연소 모형 챔버의 내부 크기를 고려하여 70 cm 이하로 절단하여 실험에 사용하였다.

본 연구에서 사용한 연소 모형 챔버는 EPA Method 5G (U.S. EPA, 2007)를 기반으로 내부가 가로 1.0 m, 세로 1.0 m, 높이 1.0 m 크기의 황토 벽돌로 제작 하였다. 농업잔재물을 투입 할 수 있도록 전면 하부에 가로 0.6 m, 세로 0.3 m의 투입구가 설치된 반개방 구조로 하였다(그림 2). 연소 모형 챔버의 상부에는 배가스가 개방된 전면으로 배출되지 않고, 열부력에 의해 상부로 배출되도록 하기 위하여 가로, 세로 각각 1.0 m 크기의 후드를 설치하고, 이를 직경 0.25 m, 길이 6 m 크기의 덕트에 연결하여 외부로 배출되도록 하였다. 시료 채취 지점은 후드 끝에서 4 m 되는 지점으로 하였다. 그리고, 실험의 재현성을 확보하고, 외부의 바람 등에 의한 영향을 받지 않도록 가로 6 m, 세로 2.6 m, 폭 2.4 m 크기의 대형 챔버를 제작 하여 내부에 연소 모형 챔버를 설치하였다. 대형 챔버 내부의 온도는 약 20~27°C이었으며, 상대습도는 35~45%인 상태에서 연소 실험을 수행하였다.

선정된 시료의 연소는 개별 시료의 연소 특성을 고려하여 연소 모형 챔버 내에서 각각 15분에서 30분 동안 수행되었다(표 1). 농업잔재물의 연소과정에서 연소 시간과 연소 온도를 측정한 결과, 고추대와 들깨대의 연소는 약 7분에 최고온도에 도달한 후 완전연소까지 약 15분이 소요되었으며, 사과나무와 포도나무는 약 11분에 최고온도에 도달하여 20분 내외에서 완전연소 되었다. 모든 연소실험은 3회 반복 실시하였다.



**Fig. 2. Experimental chamber for biomass burning.**

**Table 1. Agricultural crop residues burning in this study<sup>1)</sup>.**

| Sample             | Burning duration <sup>2)</sup> (min) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Weight (kg) to burn |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| White soybean stem | 30                                   | 1076 ± 36                | 13.9 ± 0.2          |
| Pepper stem        | 15                                   | 513 ± 52                 | 6.0 ± 0.0           |
| Sesame stem        | 30                                   | 1111 ± 99                | 13.6 ± 0.1          |
| Perilla stem       | 15                                   | 639 ± 19                 | 5.6 ± 0.4           |
| Barley stem        | 15                                   | 1217 ± 176               | 4.6 ± 1.7           |
| Pear branch        | 25                                   | 1013 ± 46                | 13.0 ± 0.4          |
| Apple branch       | 20                                   | 446 ± 109                | 13.0 ± 0.5          |
| Grape branch       | 20                                   | 809 ± 160                | 9.3 ± 1.9           |
| Peach branch       | 20                                   | 816 ± 92                 | 7.4 ± 0.5           |

<sup>1)</sup>All experiments were run in triplicate.<sup>2)</sup>including ignition time, flaming time, and smoldering time.**Table 2. Analytical condition of GC/MS with thermal desorber.**

| Instrument                    | Analytical condition                                                                      |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thermal Desorber<br>(Markers) | Desorption temperature: 300°C                                                             |
|                               | Desorption time: 5 min                                                                    |
|                               | Desorption flow rate: 45 mL/min                                                           |
|                               | Tube: Tenax-TA                                                                            |
|                               | Cold Trap low and high temperature: -10/300°C                                             |
| GC<br>(HP7850 Agilent)        | GC column: Agilent DB-1MS (60 m × 0.32 mm × 0.5 mm)                                       |
|                               | Oven Temperature: 35°C → 5 min holding → 230°C (6°C/min) → 15 min holding; total 52.5 min |
| MSD<br>(HP5975 Agilent)       | Detector type: EI (Electron Ion)                                                          |
|                               | Electron Energy: 70 eV                                                                    |
|                               | Detection Mode: TIC (Scan), m/z 35 ~ 350                                                  |

## 2. 2 측정항목 및 분석방법

### 2. 2. 1 입자상물질

농업잔재물에서 배출되는 입자상 대기오염물질은 굴뚝먼지측정기 (Stack sampling system, KNJ, Korea) 를 이용하여 등속흡인하여 시료를 채취 하였다. 미세먼지는 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> Cyclone Kit를 장착하여 15~30분간 등속흡인을 실시하여 시료를 채취하였다. 시료를 채취하기 위해 사용된 여지는 원통형 여지 (ADVANTEC, 88R)와 원형 여지 (Whatman, QMA, 47 mm)를 사용하였으며, 중량농도를 분석하기 위해 마이크로 천칭 (0.01 mg 단위)을 사용하였다. 먼지의 입경별 농도분포 측정에 사용한 측정기는 32 채널 [0.25 ~ 32 µm (31channels), > 32 µm]의 먼지입경을 측정할 수 있는 광산란방식의 Grimm 1.109 (Portable Aerosol Monitor, Grimm Aerosol Technik, Germany)를 사용하였으며, 등속흡인을 위해 Grimm 1.152 (Isokinetic channel probe, Grimm Aerosol Technik,

Germany)를 사용하였다.

### 2. 2. 2 가스상물질

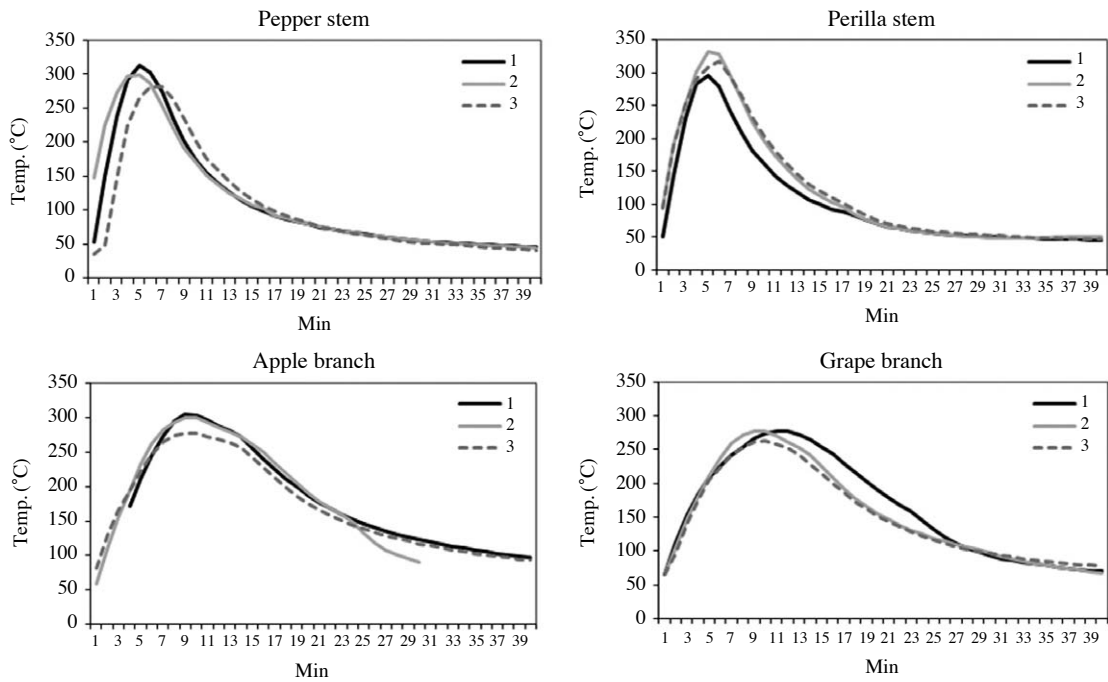
가스상 대기오염물질 중 CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>는 실시간 가스분석기 (ENERAC 500, USA)을 사용하여 연소가스에서 직접 측정되었다. 연소가스는 흡인상자법을 이용하여 시료채취주머니 (Tedlar bag)에 포집시켜 실험실 이동 후 TVOC와 VOC를 분석하였다. TVOC는 총탄화수소 분석기 (Model-200, VIG Industries, USA)를 사용하여 분석되었다. 시료채취주머니의 3 L 가스시료는 고체흡착관 (Tenax-TA, Supelco, USA)를 이용하여 전량 흡착시킨 후 열탈착장치 (Thermal desorber)가 장착된 가스크로마토그래프-질량분석기 (Gas Chromatograph/Mass Spectrometer)를 사용하여 VOCs의 성상을 분석하였다. VOCs의 구체적인 분석 조건은 표 2와 같다.

### 2. 2. 3 발열량 및 원소조성

선정된 농업잔재물 시료의 발열량은 자동열량계

**Table 3. Physicochemical characteristics of raw residues (dry basis).**

| Sample             | Caloric value<br>(kcal/kg) | Moisture content<br>(w/w%) | Elementary composition (%) |     |     |     |        |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|--------|
|                    |                            |                            | C                          | H   | N   | S   | Others |
| White soybean stem | 3,835                      | 3.5                        | 40.6                       | 6.0 | 1.1 | 0.0 | 52.3   |
| Pepper stem        | 4,181                      | 4.4                        | 45.4                       | 5.7 | 0.6 | 0.0 | 48.4   |
| Sesame stem        | 3,947                      | 5.1                        | 42.5                       | 5.3 | 0.6 | 0.0 | 51.5   |
| Perilla stem       | 3,815                      | 2.6                        | 40.9                       | 5.5 | 1.5 | 0.0 | 52.1   |
| Barley stem        | 3,620                      | 2.2                        | 39.4                       | 5.1 | 0.4 | 0.0 | 55.1   |
| Pear branch        | 4,293                      | 11.1                       | 44.5                       | 5.4 | 1.2 | 0.0 | 48.9   |
| Apple branch       | 4,147                      | 9.3                        | 44.9                       | 5.8 | 0.7 | 0.0 | 48.6   |
| Grape branch       | 4,218                      | 7.5                        | 44.7                       | 5.7 | 0.8 | 0.0 | 48.9   |
| Peach branch       | 3,940                      | 9.2                        | 42.0                       | 5.4 | 1.5 | 0.0 | 51.1   |



**Fig. 3. Temperature variation during agricultural crop residue burning.**

(C2000 basic version, IKA, German)를 사용하여 분석하였으며, 원소조성은 자동원소 분석기 (EA1112, Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하여 분석하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 연소물질의 연소 특성

선정된 농업잔재물의 발열량과 원소 조성은 표 3

과 같다. 배나무의 발열량이 4,293 kcal/kg으로 가장 높게 나타났으며, 보리대가 3,620 kcal/kg으로 가장 낮은 발열량을 나타내었다. 원소조성으로는 모든 시료가 40% 내외의 탄소 함량을 나타내었으며, 수소와 질소는 각각 약 6%, 약 1%를 차지하였고, 황은 검출되지 않았다. 배나무와 복숭아나무 가지 등 과수 농업잔재물의 수분량은 7.5~11.1%로 상대적으로 높게 나타났다. 보리대의 수분량은 2.2%로 가장 낮게 나타났다. 농업잔재물의 수분함량은 계절에

**Table 4. Emission and particle size distribution of TSP, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> from biomass burning.**

| Sample             | Concentration (mg/m <sup>3</sup> ) |                  |                   | Emission factor (g/kg) |                  |                   | Particle size distribution (PM/TSP) <sup>1)</sup> |                  |                   |
|--------------------|------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------------------|------------------|-------------------|
|                    | TSP                                | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | TSP                    | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | TSP                                               | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> |
| White soybean stem | 396                                | 157              | 133               | 30.0                   | 12.0             | 10.1              | 1.000                                             | 0.396            | 0.335             |
| Pepper stem        | 304                                | 113              | 93                | 26.0                   | 9.7              | 7.9               | 1.000                                             | 0.373            | 0.305             |
| Sesame stem        | 724                                | 200              | 168               | 59.6                   | 16.3             | 13.8              | 1.000                                             | 0.276            | 0.232             |
| Perilla stem       | 598                                | 224              | 189               | 67.5                   | 25.5             | 21.4              | 1.000                                             | 0.376            | 0.316             |
| Barley stem        | 716                                | 377              | 277               | 85.8                   | 53.1             | 35.2              | 1.000                                             | 0.526            | 0.387             |
| Pear branch        | 378                                | 145              | 109               | 29.5                   | 11.3             | 8.5               | 1.000                                             | 0.383            | 0.287             |
| Apple branch       | 487                                | 401              | 357               | 22.9                   | 18.9             | 16.8              | 1.000                                             | 0.824            | 0.734             |
| Grape branch       | 436                                | 186              | 121               | 34.5                   | 14.8             | 9.5               | 1.000                                             | 0.426            | 0.277             |
| Peach branch       | 293                                | 102              | 86                | 32.4                   | 11.2             | 9.5               | 1.000                                             | 0.349            | 0.294             |
| Total              |                                    |                  |                   |                        |                  |                   | 1.000                                             | 0.440            | 0.354             |

<sup>1)</sup> calculated based on the measurement of mass concentration.

따라 상이한 차이를 보이겠지만, 주로 봄과 초여름에 노천 소각되는 점을 고려하여 본 연구에서는 봄철과 초여름에 시료를 현장에서 수집하여 실험을 수행하였다.

농업잔재물의 노천소각에 따른 연소 과정은 크게 3단계로 구분할 수 있을 것이다. 1단계는 점화 및 착화가 시작되는 단계, 2단계는 연소가 활발히 진행되고 있는 단계, 3단계는 잔 불씨가 남아 완전하게 연소가 마무리 되는 단계이다. 그림 3은 농업잔재물 중 고추대와 들깨대, 사과나무와 포도나무 가지의 연소 과정의 온도 변화를 나타낸 것으로 고추대 및 들깨대의 연소는 약 7분에 최고온도에 도달하여 활발히 연소되는 시간이 15분 내외로 나타났으며, 사과 및 포도나무는 약 11분에 최고온도에 도달하였으며, 활발히 연소되는 시간이 30분 정도로 나타났다.

### 3. 2 입자상 대기오염물질

농업잔재물 연소 시 입자상 대기오염물질의 배출 농도 및 배출계수는 표 4와 같으며, 농업잔재물 종류에 따라 입자상 대기오염물질의 농도는 293~724 mg/m<sup>3</sup>로 다양하게 나타났다. 특히, TSP는 참깨대와 보리대가 비교적 높게 나타났으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우에는 사과나무와 보리대에서 높게 나타났다. 입자상 대기오염물질의 배출계수는 덕트를 통과한 배출가스 유량과 사용한 농업잔재물의 무게를 고려하여 다음의 식과 같이 산출하였다(Park *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2010; U.S. EPA, 1997).

$$\begin{aligned} \text{미세먼지 배출계수} &= \left( \frac{\text{g} - \text{PM}}{\text{kg} - \text{biomass}} \right) \\ &= \frac{\text{미세먼지 농도}(\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{배출가스유량}(\text{m}^3)}{\text{사용한 농업 잔재물 무게}(\text{kg}) \times 10^3} \end{aligned}$$

농업잔재물의 TSP 배출계수는 보리대가 85.8 g/kg로 가장 높게 나타났으며, 사과나무 가지가 22.9 g/kg로 가장 낮게 나타났다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>에서는 보리대가 각각 53.1 g/kg과 35.2 g/kg로 가장 높은 수준을, 고추대가 각각 9.7 g/kg과 7.9 g/kg로 가장 낮은 수준을 나타내었다.

농업잔재물의 종류에 따른 미세먼지의 배출 특성은 농업잔재물에 포함된 수분 함유량과 불완전연소 특성을 나타낼 수 있는 CO와 TVOC에 따른 상관성은 크게 나타나지 않았다. 농업잔재물 노천소각에 따른 미세먼지의 배출 특성으로 포도나무, 배나무, 복숭아나무, 사과나무 가지와 같은 과수가지와 비과수가지로 구분되어 나타났다. 과수가지는 상대적으로 TSP의 배출계수의 편차가 작게 나타났고, 비과수가지의 TSP 배출계수의 편차는 매우 크게 나타났다. 특히, 보릿대와 들깨대는 수분 함유량도 2.2~2.6%로 매우 낮았고, 연소시간도 짧으면서 TSP의 배출계수는 제일 높게 나타났다. 농업잔재물의 노천소각에 따른 먼지의 배출 특성은 연료의 수분 함유량, 발열량, 원소조성, 밀도에 따라 매우 상이하게 나타나는 것으로 보이며, 수분 함유량에 따른 배출 특성은 동일한 농업잔재물에서의 비교가 더 의미가 있을 것으로 보인다.

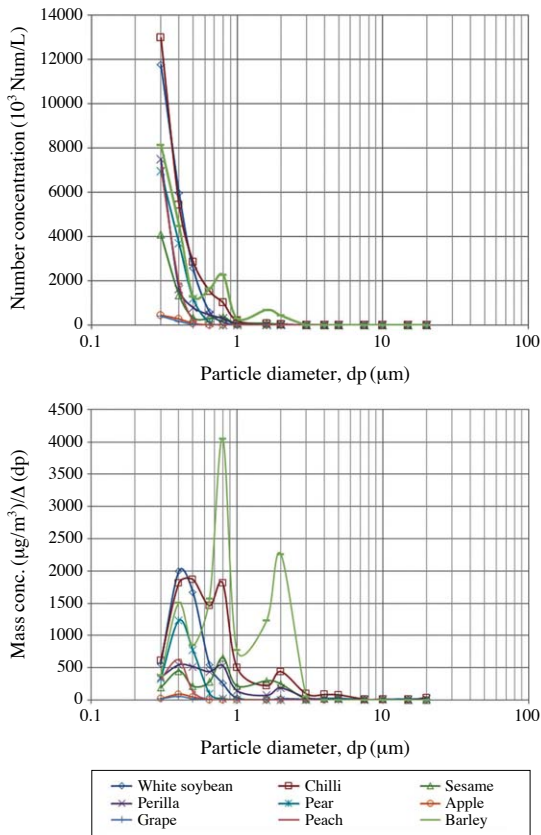


Fig. 4. Particle size distribution from biomass burning: particulate number (top) and concentration (bottom).

그림 4는 농업잔재물의 연소 배가스 내 먼지의 입경분포 특성을 보여주고 있다. 먼지의 개수 분포는 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자에 의해 좌우되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 입자의 질량 분포는 모든 입경 범위에서 상대적으로 균일하게 분포되어 나타났다. 또한, 표 4에 제시된 중량농도의 측정값을 토대로 산정된 입경분율을 살펴보면, 총먼지 중  $\text{PM}_{2.5}$ 가 차지하는 비율이 참깨대가 23.2%로 가장 낮았으며 73.4%를 보인 사과나무가 가장 큰 값을 보였다. 바이오매스 연소시  $\text{PM}_{2.5}$ 의 비율이 상대적으로 높게 나타나는 경향은 많은 연구자들에 의해 보고되고 있다 (Sanchis *et al.*, 2014)

본 연구의 농업잔재물 연소에서 발생하는 입자상 물질은 미세입자(fine particle) 또는 극미세입자(ultra-

Table 5. Emission factors of gaseous pollutants from biomass burning.

| Sample             | Emission factor (g/kg) |       |       |
|--------------------|------------------------|-------|-------|
|                    | CO                     | NO    | TVOC  |
| White soybean stem | 184                    | 7.17  | 27.4  |
| Pepper stem        | 207                    | 4.94  | 40.3  |
| Sesame stem        | 237                    | 6.47  | 109.5 |
| Perilla stem       | 296                    | 8.59  | 54.2  |
| Barley stem        | 201                    | 5.21  | 105.2 |
| Pear branch        | 238                    | 8.74  | 87.7  |
| Apple branch       | 146                    | 10.36 | 353.3 |
| Grape branch       | 305                    | 14.44 | 154.6 |
| Peach branch       | 277                    | 15.02 | 51.6  |

fine particle)로 볼 수 있으며, 조대입자(coarse particle)에 비해 질량당 위해도가 높다는 점을 고려해 볼 때 대기질 관리 차원에서 매우 주요한 오염물질이라 할 수 있겠다.

### 3.3 가스상 대기오염물질

농업잔재물 연소에서 배출되는 가스상 대기오염물질에서는 CO, NO, VOCs 등이 검출되었으나  $\text{NO}_2$  및  $\text{SO}_2$ 는 검출되지 않았다. 농업잔재물에서 CO, NO, TVOC의 배출계수는 각각 146~305 g/kg, 4.81~15.02 g/kg, 27~353 g/kg으로 산출되었다(표 5). 바이오매스의 연소는 착화(ignition), 불꽃연소(flaming), 훈소(smoldering)과정으로 구분된다. 훈소과정은 연소조건이 취약한 마지막 연소단계로서 연소온도가 낮고, 연소공기와 바이오매스와의 혼합이 불충분하고, 연소가스의 체류시간이 짧은 특징이 있다. 따라서 훈소과정에서 불완전 연소물인 CO, 암모니아, 비메탄계 탄화수소 등이 발생될 가능성이 매우 높다(Khan *et al.*, 2009). 본 연구의 실험접근법상에서 연소시간에 따른 연소가스 발생경향을 파악하지는 못했지만, 표 5에서 볼 수 있듯이 높은 일산화탄소 발생을 확인할 수 있었다.

표 6은 비메탄계 휘발성유기화합물의 배출계수를 나타내고 있다. 벤젠의 경우 배나무 가지 연소에 의한 배출계수는 10.41 g/kg으로 가장 높은 수준으로 나타났으며, 톨루엔은 4.07 g/kg으로 보리대에서 가장 높은 수준으로 나타났다. 고추대 연소 시 1,3-dichlorobenzene의 배출계수는 3.78 g/kg이었으며, 포도나무 가지 연소 시에는 dichlorobenzene 이성질체의 배출계수가 1.92~1.98 g/kg로 나타났다. 특히, 농업잔

Table 6. Emission factors of volatile organic compounds from biomass burning.

| Sample             | Emission factor (g/kg) |         |                |               |          |            |         |                      |                      |                      |
|--------------------|------------------------|---------|----------------|---------------|----------|------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                    | Benzene                | Toluene | Chloro-benzene | Ethyl-benzene | p-Xylene | m,o-Xylene | Styrene | 1,3-Dichloro benzene | 1,4-Dichloro benzene | 1,2-Dichloro benzene |
| White soybean stem | 4.41                   | 2.46    | 0.53           | 2.14          | 0.88     | 1.64       | 1.02    | 0.89                 | 0.97                 | 0.89                 |
| Pepper stem        | 5.24                   | 3.77    | 0.65           | 0.87          | 0.79     | 1.17       | 2.03    | 3.78                 | 0.88                 | 0.56                 |
| Sesame stem        | 2.53                   | 1.09    | 0.20           | 0.20          | 0.11     | 0.21       | 0.72    | 0.58                 | 1.18                 | 1.89                 |
| Perilla stem       | 0.56                   | 0.42    | 0.32           | 0.16          | 0.08     | 0.14       | 0.82    | 1.36                 | 2.06                 | 2.42                 |
| Barley stem        | 5.54                   | 4.07    | 0.21           | 1.32          | 1.46     | 2.73       | 1.85    | 0.10                 | 0.20                 | 0.56                 |
| Pear branch        | 0.88                   | 0.53    | 0.04           | 0.04          | 0.02     | 0.03       | 0.12    | 0.03                 | 0.05                 | 0.33                 |
| Apple branch       | 1.91                   | 0.44    | 0.10           | 0.60          | 0.19     | 0.36       | 0.87    | 0.14                 | 0.02                 | 0.70                 |
| Grape branch       | 3.44                   | 3.19    | 0.38           | 2.28          | 1.11     | 2.07       | 1.33    | 1.95                 | 1.92                 | 1.98                 |
| Peach branch       | 10.41                  | 1.42    | 0.08           | 0.91          | 0.24     | 0.45       | 0.26    | 0.06                 | 0.04                 | 0.68                 |

재물의 연소 시에는 PAHs와 다이옥신과 같은 오염 물질이 발생될 수 있다. Sanchis *et al.* (2014)은 벚짚 연소 시 다이옥신의 배출계수를 87~156 pg TEQ/kg로 보고 하였고, PAHs는 물질에 따라 상이하나 플루오란텐 (fluoranthene)은 1,086~6925 µg/kg으로 가장 높은 배출계수를 보였다. Minomo *et al.* (2011)과 Kim (2008)은 제조체와 농약 등에 노출된 바이오매스의 연소 시 다이옥신과 같은 물질이 대기 중으로 배출될 수 있다고 보고하고 있다.

#### 4. 결 론

생물성연소는 인위적 또는 자연적인 요인에 의하여 자연계에서 일어날 수 있는 생체 연소를 의미하며, 농업잔재물은 적절한 관리가 이루어지지 않은 채 노천소각으로 처리되고 있다. 이러한 노천소각은 불완전연소가 수반되며, 다양한 입자상 및 가스상 대기오염물질을 배출하고 있다. 본 연구에서는 농업활동 과정에서 발생하는 잔재물의 소각 시 배출되는 대기오염물질의 특성을 파악하고자 실험을 수행하였다. 이를 위하여 연소 모형 챔버를 제작하여 생물성연소 중 농업잔재물 (흰콩, 고추대, 참깨대, 들깨대, 보리대, 배나무, 사과나무, 포도나무, 복숭아나무 가지)에서 배출되는 대기오염물질의 특성을 파악하였다.

1) 농업잔재물의 총 발열량은 배나무 가지가 4,293.0 kcal/kg으로 가장 높게 나타났으며, 보리대가 3,620 kcal/kg으로 가장 낮은 수준으로 나타났다. 원소조성은 탄소가 39~45%, 수소, 질소 순으로 5~7%,

0.5~1.6%를 차지하고, 황은 검출되지 않은 것으로 나타났다.

2) 농업잔재물 연소 시 먼지의 개수 농도는 입경 1 µm 이하의 물질이 차지하는 비율이 높았으며, 사과나무 가지는 총먼지 중 PM<sub>2.5</sub>이 차지하는 질량 비율이 73.4%로 나타났다.

3) TSP의 배출계수는 보리대가 85.8 g/kg로 가장 높게 나타났으며, 사과나무 가지가 22.9 g/kg로 가장 낮게 나타났다. PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 배출계수는 보리대가 53.1 g/kg, 35.2 g/kg로 가장 높은 수준으로 고추대가 9.7 g/kg, 7.9 g/kg로 가장 낮은 수준으로 나타났다.

4) 가스상 대기오염물질에서는 CO, NO, 비메탄계 탄화수소가 검출되었으며, NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>는 검출되지 않았다. 농업잔재물에서 CO, NO, TVOC의 배출계수는 각각 146~305 g/kg, 4.94~15.02 g/kg, 27.4~353.3 g/kg으로 산정되었다. 휘발성유기화합물 중 벤젠의 배출계수는 농업잔재물의 노천소각에서 0.56~10.41 g/kg으로 높은 수준으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 농업잔재물의 노천소각에 의한 대기오염물질의 배출계수는 국내에서 개발된 배출계수로서 활동도를 고려하여 배출량을 정확하게 산정하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 분야별 배출량 산정을 통하여 전체 생물성연소 및 연료연소 등에 의한 대기오염물질별 배출 기여율을 평가하여 대기질 개선을 위한 우선순위를 선정하고, 대기질 개선 방안의 도출에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 특히, 농업활동 과정에서 지금까지는 특별한 고려 없이 손쉬운 노천 소각 처

리 하던 것을 지양하고, 자원화하는 방안 등을 마련하여 대기질 개선과 온실가스 저감을 위한 공편익적인 수단의 마련이 필요해 보인다.

또한, 농업잔재물의 노천소각 시 발생하는 PAHs 등의 미량의 유기성 물질에 대한 배출 특성을 파악하고, 이러한 유해한 유기성 물질의 배출원과 대기 중 거동을 파악하여 인체에 미치는 영향 등에 대한 후속적인 연구가 필요해 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 2011년 차세대 에코이노베이션기술개발사업 (411-113-011)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- Black, R.R., C.P. Meyer, A. Touati, B.K. Gullett, H. Fiedler, and J.F. Mueller (2012) Emission factors for PCDD/PCDF and dl-PCB from open burning of biomass, *Environ. Int.*, 38(1), 62-66.
- Chang, S.S., W.J. Lee, T.M. Holsen, H.W. Li, L.C. Wang, and G.P. Chang-Chien (2014) Emission of polychlorinated-*p*-dibenzo dioxin, dibenzofurans (PCDD/Fs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) from rice straw biomass burning, *Atmos. Environ.*, 94, 573-581.
- GRI(Gyeonggi Research Institute) (2011) Analysis of air pollutants emissions from biomass burning in Seoul Metropolitan area, 3-4.
- Hwang, I.J., Y.H. Cho, W.G. Choi, H.M. Lee, and T.O. Kim (2008) Quantitative estimation of PM10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(1), 100-107.
- Khan, A.A., W. de Jong, P.J. Jansens, and H. Spliethoff (2009) Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies, *Fuel Process. Technol.*, 90(1) 21-50.
- Kim, K.H., D.K. Kim, J.H. Hong, and Y.M. Jo (2009) Evaluation of emission factor of air pollutants emitted from open burning of municipal solid waste, *J. Mater. Cycle Waste Manag.*, 26(2), 161-167.
- Kim, P.S., Y.K. Jang, J.I. Shin, J.S. Kim, and J.Y. An (2010) A study on estimation of air pollutants emission from residential wood stove, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(3), 276-285.
- Kim, Y.J. (2008) Discharge of dioxine by open-air burning of domestic and agricultural wastes, *J. Mater. Cycle Waste Manag.*, 25(1), 66-72.
- Koppmann, R., K. von Czaplewski, and J.S. Reid (2005) A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compound, *Atmos. Chem. phys. Discuss.*, 5, 10455-10516.
- Lee, H.W., T.J. Lee, and D.S. Kim (2009a) Identifying ambient PM<sub>2.5</sub> sources and estimating their contributions by analyzing ECs and OCs, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(1), 75-89.
- Lee, T.J., J.B. Hur, S.M. Yi, S.D. Kim, and D.S. Kim (2009b) Estimation of PM10 source contributions on three cities in the metropolitan area by using PMF model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(4), 275-288.
- Minomo, K., N. Ohtsukaa, K. Nojiria, S. Hosonoa, and K. Kawamurab (2011) Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans, and dioxin-like polychlorinated biphenyls in rice straw smoke and their origins in Japan, *Chemosphere*, 84(7), 950-956.
- NIER (National Institute of Environment Research) (2014) A guide book on the calculation method of air pollution emission from biomass burning.
- Park, S.K., S.J. Choi, J.Y. Kim, G.J. Park, U.H. Hwang, J.J. Lee, and T.S. Kim (2013) A Field Survey on the Characteristics of Air Pollutants Emission from Commercial Charcoal Kiln, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(5), 601-614.
- Park, S.K., S.J. Choi, J.Y. Kim, Y.I. Lee, D.Y. Kim, and Y.K. Jang (2012) Estimation of air pollutants emission factors from open burning of agriculture wastes in sector of biomass burning, *Proceeding of the KOSAE 2012 Autumn Annual Meeting*, 25-26.
- Sanchis, E., M. Ferrer, S. Calvet, C. Coscolla, V. Yusa, and M. Cambra-Lopez (2014) Gaseous and particulate emission profiles during controlled rice straw burning, *Atmos. Environ.*, 98, 25-31.
- U.S. EPA (1997) AP-42 Section 9.5 Introduction to Animal & Meat Products Preparation.
- U.S. EPA (2007) TTN EMC Method 5G-PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel.