

Comparison of Domestic and Overseas Allowable Standards Related to Emissions from Wood Pellet Combustion¹

In Yang² · Gyu-Seong Han ^{3,†}

ABSTRACT

This article explains the types of emissions from wood combustion, how they are generated and the degree of harmful influence on the human body, and a comparison between domestic and overseas allowable standards regarding the safety of wood pellets, the allowable amount of emissions caused by combustion and so on was conducted.

Keywords: wood pellet, safety, combustion, emissions, particulate matter, health risk

1. INTRODUCTION

Combustion refers to the reaction of a material with oxygen in the air to release heat and light, which converts the chemical energy of the material into thermal energy (Tillman *et al.*, 1981). Fuel is, therefore, required for combustion, and it is generally easier to combust liquids than solids, and it is easier to burn gases than liquids. For combustion, the temperature must be raised above the ignition point, and an ignition point is the temperature at which a fire is caused by heat without a flame. The certain amount of oxygen is needed for combustion.

When a substance is burned, a new one is produced. Fossil fuels such as petroleum, coal, and natural gas are converted to carbon dioxide and water vapor through combustion (Tillman *et al.*, 1981). When sulfur,

nitrogen, and phosphorus are contained in the combustion substance, sulfur oxide (SO_x), nitrogen oxide (NO_x), and phosphorus pentoxide (P₂O₅) are generated as combustion byproducts. When wood burns, it mainly produces water vapor and carbon dioxide. Besides, carbon monoxide (CO), NO_x and SO_x, hydrocarbons (HC), volatile organic compounds (VOCs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), and particulate matter (PM), are generated. Wood pellets are fuels for heat production or sustainable energy fuels with great potential as a substitute for electricity (REN, 2016). Thus, when wood pellets are burned, substances such as VOCs, PAH and PM, similar to when ordinary woods are burned, occur. Excessive exposure to these substances can cause cancer along with severe cardiopulmonary damage. In this regard, there are reports in Korea that cite data that are not fully verified,

¹ Date Received August 10, 2018, Date Accepted September 8, 2018

² SCION. Te Papa Tipu Innovation Park, 49 Sala Street, Private Bag 3020, Rotorua 3046, New Zealand

³ Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life & Environments Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

† Corresponding author: Gyu-Seong Han (e-mail: wood@chungbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3835-2063)

which causes controversy (Kim, 2017). This is because studies on wood pellets in Korea focus mainly on fuel characteristics (Kim *et al.*, 2015) or boiler combustion performance, but there is little information on substances emitted from wood pellet combustion.

Some existing wood combustion systems bring about incomplete combustion due to combustion under inappropriate conditions, and therefore, CO, HC and soot are generated. However, biomass fuels such as wood pellets, whose production has increased significantly in recent years, have resulted in optimized combustion that can be controlled, reducing the incidence of substances incompletely combusted, and they have advantages such as cleanliness, dryness, and ease of injection suitable for being used as fuel. To use these fuels safely without affecting the human body negatively, however, specific information on various substances generated from the combustion of various biomass raw materials, regulatory standards and evaluation methods should be prepared. This article explains the types of emissions from wood combustion, how they are generated and the degree of harmful influence on the human body, and a comparison between domestic and overseas allowable standards regarding the safety of wood pellets, the allowable amount of emissions caused by combustion and so on was conducted.

2. POSSIBILITY OF EMISSIONS FROM WOOD PELLET COMBUSTION AFFECTING HUMAN BODY ADVERSELY

2.1. Carbon monoxide (CO)

CO is a colorless, odorless gas which is mainly produced by oxygen deficiency or incomplete combustion and is contained in combustion gas of coal briquettes or exhaust gas of automobiles. Theoretically, when the excess air ratio for complete combustion is

adjusted to 14.8% or more, no CO is generated (McDonald, 2009). CO itself is not toxic, but it binds to hemoglobin in the blood within the lungs, thereby interfering with the ability to supply oxygen into the body, and therefore, it causes oxygen deficiency in tissue cells, eventually resulting in addiction symptoms. When the inhalation of CO results in insufficient oxygen supply, the central nervous system (brain, spine), which is sensitive to oxygen deficiency, is affected. This can lead to headaches, dizziness, tinnitus, heart palpitations, increased pulse, and vomiting. In the worst case, CO poisoning may cause anesthesia. Especially if carbon monoxide-hemoglobin concentration is more than 60%, people lost their consciousness, and if this condition persists for a long time, people may die because oxygen supply discontinues.

2.2. Nitrogen Oxides (NO_x) and Sulfur Oxides (SO_x)

NO_x is produced by the reaction of oxygen and nitrogen at high temperatures, and in the case that its concentration is high, it causes oxygen deficiency, hypofunction of the central nervous system. It is also a major cause of optical smog. Being emissions that occur when fuels containing sulfur are burned, SO_x occurs mainly in forms of SO₂ (sulfur dioxide) and SO₃ (sulfur trioxide). On the other hand, it is known that SO₂ is mainly generated in exhaust gas, and when wood is burned, its trace amounts are generated (Obernberger *et al.*, 2006). NO_x and SO_x act as precursors of ultrafine dust that is secondly generated, and therefore, they are regarded as harmful compounds to be noted.

2.3. Hydrocarbons (HC)

HC refers to organic compounds composed of carbon and hydrogen and exists in natural gas, petroleum, natural rubber, terpenes contained in plants, etc. (Boman

et al., 2005). HC is generated mainly by incomplete combustion of fuel, and it has the least amount around the excess air ratio for complete combustion in a combustor, but when the excess air ratio for complete combustion is exceeded, the dispersion of the flame is stopped, resulting in incomplete combustion and increasing the amount generated. Among the HCs, alkenes, olefinic HCs or saturated aliphatic HCs are the causative agents of photochemical smog since they react with ozone and NO_x in the atmosphere. On the other hand, it is known that when the concentration of HC increases, it stimulates the mucous membrane and destroys the cell tissue, and it is reported that it is deposited on the surface of the particles and penetrates into lungs along with heavy metals.

2.4. Volatile organic compounds (VOCs)

VOCs are a generic term for liquid or gaseous organic compounds that evaporate readily into the atmosphere. It is a substance that causes a photochemical reaction in the atmosphere, or generates photochemical oxidizing substances such as ozone, thereby causing photochemical smog (US-EPA, 2017). VOCs cause air pollution and are carcinogenic, and since it is one of the sources of global warming, every country controls it politically to reduce their emissions. There are a variety of VOCs ranging from solvents used in industries to organic gases emitted from chemical and pharmaceutical plants or plastic drying processes. Liquid fuels with low boiling points, paraffin, olefins, and aromatic compounds are the commonly used VOCs in daily life (Perzon, 2010). In Korea, substances and products such as benzene, acetylene, and gasoline are currently regulated under the Clean Air Conservation Act (ME, 2017a). The emission sources of VOCs include natural sites such as soil, wetlands, plants and trees, and grasslands. In addition, VOCs are also artificially

discharged in such locations as facilities using organic solvents, paint facilities, laundries, storing places for oil, gas stations, and exhaust gases from various transportation means. Globally, most of the emissions are from the facilities using organic solvents and such mobile sources of pollution as automobiles. As these VOCs have a great impact on the environment and the human body, most countries are making policy efforts to reduce emissions (ME, 2018).

2.5. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)

A compound having a condensed ring in which two or more rings each have two or more atoms shared is referred to as a polycyclic compound, and a carbocyclic compound having a benzene nucleus is referred to as an aromatic compound. Examples of the substances belonging to PAH include aromatic hydrocarbons such as naphthalene and anthracene, and organic compounds including derivatives thereof. These PAHs, as persistent pollutants, do not decompose naturally when released into the environment and exist for a long time in atmospheric, soil or aquatic environments (Riva *et al.*, 2011). PAH, as carcinogenic or mutagenic substances, is known to have adverse effects when ingested by humans.

2.6. Particulate matter (PM)

Particulate matter (PM) is a fine substance in a solid or liquid state which is generated by mechanical treatment such as crushing and sorting of materials or combustion, synthesis, and the like. The size is larger than a single molecule with a diameter of 0.0002 μm and smaller than 500 μm . On the other hand, a PM having a size of 0.001-100 μm is called an aerosol, and it is generally classified into PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ depending on its size. These PMs stay in the

atmosphere for several seconds to several months, while particles smaller than 0.1 μm in diameter undergo free Brownian motion in the atmosphere and collide with each molecule. It is divided into primary and secondary particles depending on the generation process. The primary particles are emitted directly from the source to the atmosphere, such as sea salt, soils, and combustion particles (Kim *et al.*, 2011). Secondary particles are the ones formed by the photochemical and thermochemical reactions of gaseous materials released into the atmosphere from the source, and their constituents are mainly sulfate, nitrate, ammonium salts and organic substances. Depending on their size, source and shape, large and small particles that are present in the atmosphere are classified into particles, aerosols, dusts, droplets, fly ash, fog, fumes, mist, smoke, smog, and soot (Burkhard & Russel, 2009).

The sizes of particles present in the atmosphere greatly affects the properties of the emissions, and when they are present in the atmosphere, fine dust particles can enter the lungs and respiratory system of the human body and cause catastrophic damage as well as visibility obstruction. Also, when they accumulate on the leaves of plants, they block the sunlight and interfere with photosynthesis, which has a bad influence on growth, and when harmful chemical components are deposited on plants, they cause indirect damages to animals feeding on these plants.

2.7. Research Cases of Human Health Hazards due to Emissions

Boman *et al.* (2005) conducted a literature review of the various emissions that occur when wood is burned and reported the results of the toxic effects of emissions.

In general, PM₁₀ with a diameter of less than 10 μm was found to affect asthma, cardiopulmonary disease, and so on. In addition, Boman *et al.* have challenged the assumption that wood burning in houses is a major

cause of PM and that the impact of PM in the area contaminated by wood burning emissions on the human body is not significant compared with other regions. However, these results were attributed to the use of firewood stoves.

After comparing the amount of emissions according to the combustion conditions of the firewood stoves, various types of emissions were detected, and the amount of emissions varied according to species (birch, conifer) and water content. Large amounts of incomplete combustibles occurred in firewood stoves combusting conifers with high water content, but it was possible to control the emission level by applying appropriate technological operating methods. There was room for further improvement through additional development and optimization. Thus, using high quality solid biofuels in pellet stoves with adjustable combustion conditions offers many advantages over using firewood stoves, which are conventional combustion devices.

A comparison of PM emissions with a firewood stove or a pellet stove indicated that the pellet stove was effective in reducing PM emissions, and their emissions were about 37-160 mg/MJ and 15-46 mg/MJ, respectively. The size of PM generated in the pellet stove was mostly 1 μm , but the PM in the firewood stove was found to vary in size. On the other hand, in a large capacity pellet stove, a small amount of PM was generated, and the sizes of PM were also almost the same, and the size and the shape of the pellets affected the size and distribution of PM. Finally, a comparison of the amount of emissions harmful to the human body to fuel input in a pellet stove showed that the emission factor of CO and PAH (emissions relative to fuel consumption) was higher under low fuel conditions. The results indicate that, under properly controlled combustion conditions, high quality wood pellet combustion offers advantages such as improved thermal efficiency and reduced emissions compared to conventional wood burning such as firewood.

3. COMPARISON OF DOMESTIC AND OVERSEAS ATMOSPHERIC ENVIRONMENTAL STANDARDS RELATED TO WOOD PELLET COMBUSTION

Domestic regulations related to emissions from combustion of wood pellets include the Clean Air Conservation Act (ME, 2017a). For the emissions from large combustion plants of a certain scale or more, the current Clean Air Conservation Act regulates 1) among biomass and wood pellet manufacturing facilities, the ones with a fuel consumption of 30 kg or more per hour, a volume of 3m³ or more, or a power of 3hp (20hp for crushing facilities) or more, 2) screening, drying and heating, crushing, compression and molding facilities, 3) among facilities using biomass and wood pellets, the ones with fuel consumption of more than 200kg per hour, but facilities that burn other fuels with wood pellets are excluded (ME, 2017a).

In North America, the emission of wood pellets is not only regulated, but also the total combustion emissions are regulated (Bäfver *et al.*, 2011). For example, the US Environmental Protection Agency (EPA) has strictly regulated emissions through the National Ambient Air Quality Status (US-EPA, 2017) by setting the types and allowable emissions of combustion emissions. Canada, on the other hand, manages emissions from wood pellets through the Environmental Management Act established by the Ministry of Environment (BC-ME, 2011).

Korea's atmospheric environmental standards are little or no different from most European and Japanese standards. On the other hand, it is higher than North American and Asian standards (Villeneuve *et al.*, 2012). Next, after comparing the emission allowance standards of domestic and overseas wood pellet manufacturing and use facilities, we found that Korea set and managed the standards related to CO, NO_x, and PM. On the other

hand, in the United States, PM is regulated based on the visible distance of PM, and Canada has also set and managed standards of PM emissions from drying, heating, and use facilities. These have been found to be very low compared to Korean standards (Pa *et al.*, 2011; Pa *et al.*, 2013). It was also found that the limits for CO and NO_x in Europe and North America were based on general atmosphere environmental standards. However, atmosphere environmental standards related to the combustion emissions of wood pellets have been found to be affected by wood pellet combustors rather than wood pellets themselves.

4. COMPARISON OF EMISSION ALLOWANCE STANDARDS FOR WOOD PELLET BURNERS

Regulations for wood pellet boilers for houses are being implemented both domestically and internationally as rules relating to the combustion emissions of wood pellets. In Korea, KSB 8901 manages CO, NO_x, and soot emissions from wood pellet boilers of 58 kW or less (KS, 2017). In addition, the Korea Forest Service has been implementing a pellet boiler supply project for residential use (KFS, 2018). In addition, as described earlier, the industrial scale pellet burners are managed by applying regulated values for CO, NO_x, and PM.

In the United States, there are no allowance standards for emissions from biomass combustors (Sjoding *et al.*, 2013). However, the top 25% of US biomass combustors were measured in terms of combustor capacity and emission amount. CO emission amount was in the order of stoves, hot water stoves, boilers and combined boilers, and PM emission amount was also in the order of stoves, combined boilers/boilers and hot water stoves (Burkhard and Russel, 2009). There were no significant differences in the NO_x emissions among the combined boilers, hot water stoves, boilers, and the NO_x emissions are the lowest in the stove. On the other hand, the emission

amount was examined according to the types of biomass fuels. As a result, firewood combustors were the highest, and there was no difference between wood chips and wood pellets. According to the results, considerable amounts of CO and PM are generated in stoves among combustors using wood pellets as fuels.

Europe has set the standards for emissions from pellet boilers (EN 303-5) to minimize the possibility of air pollution from emissions from pellet combustion (ECS, 2012). Standards are set for fuel injection method (manual and automatic) and capacity, respectively, and according to the results of the measurement, grades ranging from 1 to 3 were set. Grade 3 means the best quality pellet boiler. Before these standards were set, each country in Europe used its pellet boiler specifications and standards to reduce air pollution and improve the quality of pellet boilers. For example, the UK has minimized emissions of CO, organic gaseous compounds, and PM (BSI, 2007) through the allowance standards of emissions of pellet boilers. According to these standards, boilers are divided into five grades ranging from 1 to 5, and grade 5 means the highest-grade pellet boiler.

We compared each country's standards for emissions from solid fuels and pellet boilers, including emission limits for pellet boilers. In Korea, standards for CO, NO_x, PM, etc. exist as items for the permissible amount of each substance discharged from pellet boilers. On the other hand, in the EU countries such as Germany and Scandinavian countries, where wood is used as a fuel, organic gaseous compounds are included in the standards (Olsson *et al.*, 2003; SSCI, 2010; Schmidl *et al.*, 2011).

Next, we compared the domestic and overseas allowance standards for PM. In Korea, a 24-hour emission amount of PM₁₀ is measured, but in Japan, a strict control is exercised on combustion materials by setting the emission limits per hour. On the other hand, North America, Australia and the World Health Organization have set environmental standards in which up to PM_{2.5} is allowed and considered environmental

hazards and human health risks caused by microparticles (US-EPA, 2012). Korea is also continuing to work on the emission standards and measurement regulations in consideration of such overseas situations (Choi *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2011), planning to include PM_{2.5} emissions in conjunction with PM₁₀ in the emission allowance standards through various research and data collection.

Lastly, according to the PM measurement method of each country examined to date, the amount of TSP (total suspended particle) in the emissions from flues is measured according to the standard methods for the measurements of air pollution in Korea (ME, 2017b). The US is conducting an analysis of PM (PM₁₀, PM_{2.5}) in the same way as the Korean method based on the EPA 201A standards (US-EPA, 2017). In Europe, PM is measured using the dilution tunnel method (NS 3058-2) in Norway, the electrostatic dust filter method (BS 3841-1) in the UK and the heated filter method (DIN+) in Germany. Residential solid fuel burning appliances - Emission test methods (DD CEN / TS 15883: 2009) have been determined and are now in use (Qiu, 2013).

5. CONCLUSION

The combustion of wood-based fuels releases substances such as CO, NO_x, SO_x, HCs, VOCs, PAHs, and PMs in addition to water vapor and carbon dioxide. These emissions are hazardous to the human body and the environment, and through overseas case studies, PM has been identified as a major cause of asthma and cardiopulmonary disease. However, it has been found that the degree of PM emissions can be controlled by combusting the dried fuel, such as wood pellets, using appropriate techniques.

In Korea, the safety of the emissions of wood pellet combustors for residential and industrial use is set by the KS and the Clean Air Conservation Act. In Europe

and North America, not only the emissions from wood pellets but also the overall combustion emissions are controlled. Regarding the emissions from wood pellet combustion, subjects of the current Clean Air Conservation Act is no different from or slightly lower than European and Japanese standards and higher than North American and Asian standards. Germany, Scandinavian countries and Japan, which use wood as a main fuel, are managing the combustion substances by strictly setting the allowance standards.

REFERENCES

- Bäfver, L.S., Leckner, B., Tullin, C., Berntsen, M. 2011. Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves, *Biomass & Bioenergy* 35: 3648-3655.
- Boman, C., Nordin, A., Ohman, M., Bostrom, D. 2005. Emissions from small-scale combustion of biomass fuels – extensive quantification and characterization, Stockholm University, Stockholm, Sweden.
- British Columbia, Ministry of Environment. 2011. Wood pellet manufacturing facilities, BC-ME, Vancouver, Canada.
- British Standard Institute. 2007. Pellet burners for small heating boilers-definitions, requirements, testing, marking, BS EN-15270, London, England.
- Burkhard, E., Russell, N. 2009. European wood-heating technology survey: An overview of combustion principles and the energy and emissions performance characteristics of commercially available systems in Austria, Germany, Denmark, Norway, and Sweden, NYSERDA Report 10-01, Albany, NY, USA.
- Choi, D.J., Park, I.S., Lee, S.H., Chang, S.H., Chang, H.I. 2006. Analysis and evaluation of regulatory condition for the emission of domestic and foreign environmental pollution, Korea Research Institute for Environment and Development, Seoul, Korea.
- European Committee for Standardization. 2012. Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 KW – terminology, requirement, testing and marking, EN 303-5, Brussels, Belgium.
- Hong, J.H., Lee, S.B., Kang, G.H., Chang, K.W., Kim, J.H. 2011. Fine particles in the flue gas of chimney, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Kim, K.H., 2017. Wood Pellet – Renewable energy? Ultra fine dust 20 times, <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=3559653>, Seoul, Korea.
- Kim, S.G., Jo, M.R., Han, J.S., Lee, S.B., Heo, S.H., Kim, J.H., Kim, H.C., Lee, M.H., Hong, J.H. 2011. A study for arrangement of Korea air pollutants standard method in stack fine particles, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Kim, S. H., Yang, I., Han, G.-S. 2015. Effect of sawdust moisture content and particle size on the fuel characteristics of wood pellet fabricated with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* Sawdust. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(6): 757-767.
- Korea Forest Service. 2018. Standard for the support of residential wood pellet boiler, KFS, Daejeon, Korea.
- Korea Standard. 2017. Wood pellet boilers, KSB 8901, Seoul, Korea
- McDonald, R. 2009. Evaluation of gas, oil and wood pellet fueled residential heating system emissions characteristics, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA.
- Ministry of Environment. 2017a. Clean Air Conservation Act, ME, Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2017b. Standard methods for the measurements of air pollution, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Ministry of Environment. 2018. Persistent Organic Pollutants Control Act, ME, Sejong, Korea.
- Obernberger I., Brunner, T., Barnthaler, G. 2006.

- Chemical properties of solid biofuels-significance and impact, *Biomass & Bioenergy* 30(11): 973-982.
- Olsson, M., Kjallstrand, J., Petersson, G. 2003. Specification chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden, *Biomass & Bioenergy* 24(1): 51-57.
- Pa, A., Bi, X.T., Sokhansanj, S. 2011. A life cycle evaluation of wood pellet gasification for district heating in british columbia, *Bioresource Technology* 102(10): 6167-6177.
- Pa, A., Bi, X..T., Sokhansanj, S. 2013. Evaluation of wood pellet application for residential heating in british columbia based on a streamlined life cycle analysis, *Biomass & Bioenergy* 49: 109-122.
- Perzon, M. 2010. Emissions of organic compounds from the combustion of oats - a comparison with softwood pellets, *Biomass & Bioenergy* 34: 828-837.
- Qiu, G. 2013. Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions, *Renewable Energy* 50: 94-102.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2016. *Renewables 2015 - Global Status Report 2015*, REN 21, Paris, France.
- Riva G., Pedretti, E.F., Toscano, G., Duca, D. Pizzi, A. 2011. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in domestic pellet stove emissions, *Biomass & Bioenergy* 35(1): 4261-4267.
- Schmidl, C., Luisser, M., Padouvas, E., Lasselsberger, L., Rzaca, M., Cruz, C., Handler, M., Bauer, G., Puxbaum, H. 2011. Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems, *Atmospheric Environment* 45: 7443-7454.
- Sjoding, D., E. Kanoa, P. Jensen. 2013. Developing a wood pellet/densified biomass industry in washington state: opportunities and challenges, Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Subgroup on Small Combustion Installations. 2010. Options for limit values for emissions of dust from small combustion installations < 50 MWth, UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2010/eb/wg5/wg47/Informal%20documents/Info.%20doc%209_Options%20for%20PM%20ELVs%20for%20SCI%20%20final.pdf [accessed 28.11.13].
- Tillman, D.A., Rossi, A.J. and Kitto, W.D. 1981. *Wood Combustion: Principle, processes, and economics*, Academic Press, Cambridge, USA.
- United States - Environmental Protection Agency. 2017. Determination of PM10 and PM2.5 emissions from stationary sources (Constant sampling rate procedure), US-EPA Method 201A, Washington D.C., USA.
- United States - Environmental Protection Agency. 2012. Residential wood heaters, new source performance standards, Washington D.C., USA.
- United States Environmental Protection Agency. 2017. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>, Washington D.C., USA.
- Villeneuve, J., Joahnn, H.P., Palacios, Savoie, P., Godbout, S. 2012. A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units(<3MW), *Bioresource Technology* 111: 1-11.

APPENDIX

(Korean Version)

목재펠릿 연소 배출물질과 관련한 국내의 허용기준 비교

요약 : 본 총설에서는 목재연소에 따른 배출물의 종류, 발생 체제 및 인체 유해성 정도를 설명하고, 목재펠릿과 관련된 안전성, 연소에 의한 배출물의 허용량 등에 대한 국내의 기준을 비교하여 보고한다.

1. 서론

연소란 물질이 공기 중 산소를 매개로 많은 열과 빛을 동반하면서 타는 현상으로 물질이 가진 화학에너지를 열에너지로 전환시키는 반응이다(Tillman *et al.*, 1981). 따라서 연소를 위하여 연료가 필요하며, 일반적으로 고체보다 액체, 액체보다는 기체의 연소가 용이하다. 연소를 위해서는 발화점 이상으로 온도를 높여야 하는데, 발화점이란 불꽃이 직접 닿지 않고 열에 의하여 스스로 불이 붙는 온도를 의미한다. 그리고 일정량 이상의 산소가 공급되어야 연소가 완료된다.

어떠한 물질이 연소되면 새로운 물질이 생성되는데, 석유, 석탄, 천연가스와 같은 화석연료는 연소를 통하여 이산화탄소와 수증기로 변한다(Tillman *et al.*, 1981). 연소 물질 내에 황, 질소, 인이 포함되어 있는 경우, 연소부산물로 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 인산화물(P₂O₅) 등이 발생하게 된다. 목재의 경우 연소 시 주로 수증기와 이산화탄소가 생성되며, 이 외에도 일산화탄소(CO), NO_x 및 SO_x, 탄화수소(hydrocarbon, 이하 HC), 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, 이하 VOC), 다환 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon, 이하 PAH), 미세먼지(particulate matter, 이하 PM) 등이 발생하게 된다. 목재펠릿은 열 생산을 위한 연료 또는 전기의 대용으로 큰 가능성을 가진 지속가능한 에너지 연료이다(REN, 2016). 따라서 목재펠릿의 연소 시 일반 목재의 연소와 마찬가지로 VOC, PAH, PM과 같은 물질들이 발생하며, 이 물질에 대한 심한 노출은 심각한 심폐손상과 함께 암을 발생시킬 수 있다. 이와 관련하여 국내에서는 검증이 미흡한 자료를 인용한 보도를 통해 논란이 일고 있는 실정이다(Kim, 2017). 이렇게 된 것은 국내의 경우 목재펠릿 관련 연구가 주로 연료 특성(Kim *et al.*, 2015)이나 보일러 연소 성능에 초점이 맞추어짐으로써 배출물질과 관련된 정보가 거의 없었기 때문이다.

기존 일부의 목재연소 장치는 부적당한 조건에서의 연소로 불완전연소가 되고 있으며, 따라서 CO, 탄화수소, 그을음 등이 발생되고 있다. 그러나 최근 생산량이 크게 증가하고 있는 목재펠릿과 같은 바이오매스 연료는 조절되고 최적화된 연소로 불완전연소 물질의 발생량이 감소하였으며, 연료로 사용되기에 적합한 청결성, 건조성, 투입용이성 등의 장점을 가지고 있다. 그런데 이들 연료를 인체에 무해하고 안전하게 사용하기 위해서는, 다양한 바이오매스 원료의 연소로부터 발생하는 여러 물질에 대한 구체적인 정보와 규제 기준 및 평가 방안을 마련하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 총설에서는 목재연소에 따른 배출물의 종류, 발생 체제 및 인체 유해성 정도를 설명하고, 목재펠릿과 관련된 안전성, 연소에 의한 배출물의 허용량 등에 대한 국내의 기준을 비교하여 보고하고자 한다.

2. 목재펠릿 연소 배출물의 인체유해 가능성

2.1. 일산화탄소(CO)

CO는 무색, 무취의 기체로서 산소 부족 또는 불완전연소에 의하여 주로 발생하며, 연탄의 연소가스나 자동차의 배기가스 중에 많이 포함되어 있다. 이론적으로 연소기의 이론공연비(완전연소를 위한 공기와 연료의 비율)를 14.8% 이상으로 조절하면 CO가 발생하지 않는다(McDonald, 2009). CO 자체는 독성을 보유하지 않으나 폐에서 혈액 중의 헤모글로빈과 결합하여 인체 내로의 산소공급능력을 방해하고, 결과적으로 체내 조직세포의 산소부족을 불러오는 결과로서 중독증상을 일으킨다. CO의 계속된 흡입으로 체내 산소공급이 부족해지면, 산소결핍에 민감한 중추신경계(뇌, 척추)가 영향을 받아 두통, 현기증, 이명, 기슴 두근거림, 맥박 증가, 구토가 일어나고, 마침내 마취상태에 빠질 수 있다. 특히 일산화탄소-헤모글로빈 농도가 60% 이상이면, 의식을 잃고 오랫동안 방치하면 산소공급이 중단되며 심한 경우 사망에 이르게 된다.

2.2. 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x)

NO_x는 산소와 질소가 고온에서 반응하여 생성되며, 농도가 높아질 경우 산소결핍증, 중추신경 기능의 감퇴를 일으킨다. 또한 광화학스모그의 주요 원인이 된다. SO_x는 황 또는 황을 함유한 연료가 연소될 때 발생하는 배출물로 주로 SO₂(이산화황), SO₃(삼산화황)으로 대부분 발생된다. 한편 배기가스 중에서는 SO₂가 주로 발생하며, 목재 연소의 경우, 극미량이 발생하는 것으로 알려져 있다(Oberberger *et al.*, 2006). NO_x와 SO_x는 2차생성 초미세먼지의 전구체로 작용하기 때문에 주요 유해화합물로서 예의 주시되고 있다.

2.3. 탄화수소(HC)

HC는 탄소와 수소로 이루어진 유기화합물을 의미하며, 천연가스, 석유, 천연고무, 식물에 함유되는 테르펜류 등에서 존재한다(Boman *et al.*, 2005). HC는 연료의 불완전연소로 주로 발생하며, 연소기 내에서 이론공연비 전후에서 발생량이 가장 적으나 이론공연비를 초과하면 불꽃의 전파가 중단되어 불완전연소를 일으켜 발생량이 증가한다. HC는 가운데 알켄족 올레핀계 HC는 나 포화지방족 HC는 대기 속의 오존 및 NO_x와 반응하여 광화학 스모그를 일으키는 원인 물질이 된다. 한편, HC의 농도가 높아지면 점막 자극 및 세포조직을 파괴하는 것으로 알려져 있으며, 미립자의 표면에 침착하여 증진속과 함께 폐 속으로 침입하는 것으로 보고되고 있다.

2.4. 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)

VOC는 대기 중으로 쉽게 증발되는 액체 또는 기체상 유기화합물의 총칭으로, 대기 중에서 광화학반응을 일으키거나 오존 등과 광화학 산화성물질들을 생성시켜 광화학 스모그를 유발하는 물질이다(US-EPA, 2017). VOC는 대기오염 외에 발암성 물질이며, 지구온난화의 원인물질이므로 국가마다 배출을 줄이기 위하여 정책적으로 관리하고 있다. 산업체에서 많이 사용되는 용제부터 화학 및 제약공장이나 플라스틱 건조공정에서 배출되는 유기가스까지 다양하며, 끓는점이 낮은 액체연료, 파라핀, 올레핀, 방향족화합물 등이 생활주변에서 흔히 사용하는 VOC에 포함된다(Perzon, 2010). 국내의 경우 현재 대기환경보전법시행령에 따라 벤젠, 아세틸렌, 휘발유 등의 물질 및 제품이 규제대상 품목에 속한다(ME, 2017a). 배출원으로 토양과 습지·초목·조지 등의 자연적 배출원과 유기용제 사용시설, 도장시설, 세탁소, 저유소, 주유소 및 각종 운송수단의 배기가스 등의 인위적 배출원이 있는데, 배출량은 세계적으로 유기용제 사용시설과 자동차 등의 이동 오염원이 대부분을 차지한다. 이러한 VOC는 환경과 인체에 큰 영향을 끼치므로 대부분의 국가들이 배출을 줄이기 위하여 정책적으로 노력하고 있다(ME, 2018).

2.5. 다환 방향족 탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)

두 개 이상의 환에 각각 두 개 이상의 원자를 공유한 축합환을 가진 화합물을 다환식 화합물이라 하며, 벤젠핵을 갖는 탄소환식 화합물을 방향족 화합물이라고 한다. 여기에 속하는 물질로 나프탈렌, 안트라센 등과 같은 방향족 탄화수소와 그 유도체를 포괄하는 유기화합물 등이 있다. 이러한 PAH는 환경 중에 유출되면 자연적으로 잘 분해되지 않고 오랫동안 대기, 토양 혹은 수중 환경 중에 존재하는 지속성 오염물질이다(Riva *et al.*, 2011). PAH는 발암 또는 돌연변이 물질로 인체에 섭취되면 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2.6. 미세먼지(Particulate matter, PM)

물질의 파쇄 및 선별 등의 기계적 처리나 연소, 합성 등의 과정에서 생기는 고체 또는 액체 상태의 미세한 물질을 PM이라 한다. 크기는 지름 0.0002 μm의 단일분자보다 크고 500 μm보다 작다. 한편 0.001-100 μm 크기의 PM을 에어로졸이라 하며, 크기에 따라 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 등으로 구분하는 것이 일반적이다. 이 PM은 대기 중에 짧게는 수초에서 길게는 몇 달간 체류하는데, 크기가 0.1 μm보다 작은 입자들은 대기 중에서 자유 브라운운동을 하며 각각의 분자들과 충돌한다. 생성과정에 따라 1차 및 2차 입자로 구분되는데, 1차 입자는 발생원에서 대기 중으로 직접 배출되는 것으로 해염, 토양, 연소입자 등이 있다(Kim *et al.*, 2011). 2차 입자는 발생원에서 대기 중에 방출된 가스상 물질이 광화학, 열화학 반응을 하면서 생긴 입자로서 성분은 주로 황산염, 질산염, 암모늄염 및 유기물질 등이 이에 속한다. 대기 중에 존재하는 크고 작은 입자들은 크기, 발생원, 성상에 따라 티끌(particle), 에어로졸(aerosol), 먼지(dust), 작은물방울(droplet), 비산재(fly ash), 안개(fog), 증기(fume), 연무(mist), 매연(smoke), 스모그(smog), 검댕(soot) 등으로 구분된다(Burkhard & Russel, 2009).

대기 중에 존재하는 입자의 크기가 배출물의 특성에 큰 영향을 미치는데, 대기 중에 존재할 때 시정장애와 함께 일부 미세한 흡입분진은 인체의 폐나 호흡기에 들어가 치명적인 피해를 입히기도 한다. 또한 식물의 잎에 쌓이면 햇빛을 막아 탄소동화작용을

방해하여 생육에 나쁜 영향을 주며, 해로운 화학적 성분이 식물에 침전되면 이들 식물을 먹이로 하는 동물에도 피해를 주는 등 간접적 피해를 일으킨다.

2.7. 배출물의 인체 유해성 연구 사례

Boman *et al.*(2005)은 목재 연소 시 발생하는 다양한 배출물에 대한 문헌조사를 실시하였으며, 이 조사를 통하여 목재연소 배출물의 인체 유해성에 대한 결과를 보고하였다.

일반적으로 직경이 10 μm 이하의 PM10이 천식, 심폐질환 등에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 또한 주택 내의 목재연소가 PM의 주요 원인으로 목재연소 배출물에 의하여 오염된 지역의 PM이 인체에 미치는 영향은 타 지역과 비교하여 크지 않다는 가정에 이의를 제기하였다. 그러나 이와 같은 결과는 장작스토브의 사용에서 기인한 것으로 나타났다.

장작스토브의 연소조건에 따른 배출물의 양을 비교한 결과, 다양한 형태의 배출물 검출과 함께 수증(자작나무, 침엽수)과 함수율에 따라 배출물의 양에도 차이가 있었다. 높은 함수율과 침엽수를 연소시킨 장작스토브에서 많은 양의 불완전 연소물이 발생하였으나, 적절한 기술적 가동방법을 적용하여 배출정도의 조절이 가능하였으며, 추가적인 개발과 최적화를 통하여 크게 향상시킬 수 있는 여지가 있었다. 따라서 연소조건에 조절이 가능한 펠릿스토브에 고품질의 고체 바이오연료를 사용하는 것은 기존의 연소장치인 장작스토브를 사용하는 것에 비해 많은 장점을 제공하는 것으로 나타났다.

장작스토브와 펠릿스토브의 연소 시 PM 발생량을 비교한 결과, 각각 약 37-160 mg/MJ과 15-46 mg/MJ로서, PM 배출량 감소에 펠릿스토브가 효과적인 것으로 조사되었다. 펠릿스토브에서 발생하는 PM은 1 μm 크기의 것이 차지하는 비중이 높은 반면, 장작스토브에서 발생하는 PM은 크기가 광범위한 것으로 나타났다. 한편 대용량의 펠릿스토브에서는 적은 양의 PM 발생과 함께 PM의 크기도 일정하였으며, 펠릿의 크기와 연통의 모양도 PM의 크기와 분포에 영향을 미쳤다. 마지막으로 펠릿스토브에서 연료 투입량에 대한 인체 유해성 배출물의 양을 비교한 결과, 연료를 적게 투입하는 조건에서 오히려 CO와 PAH의 배출계수(연료소비량 대비 배출량)가 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 결과를 종합하면, 적절하게 조절된 연소조건에서 고품질의 목재펠릿 연소는 장작과 같은 전통적인 목재연소와 비교하여 열효율 향상 및 배출물 양의 감소 등의 장점을 제공하는 것으로 조사되었다.

3. 목재펠릿 연소에 따른 국내외 대기환경 기준의 비교

목재펠릿의 연소에 의한 배출물과 관련된 국내 규정으로는 대기환경보전법이 있다(ME, 2017a). 일정 규모 이상의 큰 연소설비에서 발생하는 배출물에 대하여 현재 대기환경보전법에 명시되어 있는 적용 대상은 1) 바이오매스 및 목재펠릿 제조시설 중 연료사용량이 시간당 30 kg 이상, 용적이 3 m³ 이상, 동력이 3 마력(파쇄·분쇄시설은 20 마력) 이상 시설, 2) 선별, 건조·가열, 파쇄·분쇄, 압축·성형시설, 3) 바이오매스 및 목재펠릿 사용시설 중 연료제품 사용량이 시간당 200 kg 이상인 시설이며, 다른 연료와 목재펠릿을 함께 연소하는 시설은 제외되고 있다(ME, 2017a).

북미에서는 목재펠릿의 연소에 의한 배출물만으로 규정하지는 않고 있으며, 전체적인 연소 배출물에 대하여 규제하고 있다(Bäfer *et al.*, 2011). 예를 들면, 미국의 경우 Environment Protection Agency (EPA)에서 National Ambient Air Quality Status에 연소 배출물의 종류 및 허용 배출량을 설정하여 엄격하게 배출물을 규제하고 있다(US-EPA, 2017). 반면, 캐나다는 Ministry of Environment에서 설정한 Environmental Management Act를 통하여 목재펠릿에서 발생하는 배출물에 대하여 관리하고 있다(BC-ME, 2011).

한국의 대기환경 기준은 대부분의 유럽 및 일본 기준과 차이가 없거나 약간 낮았다. 반면, 북미 및 아시아의 기준보다 높은 것으로 나타났다(Villeneuve *et al.*, 2012). 다음으로 국내외의 목재펠릿 제조 및 사용 시설의 배출물 허용기준을 비교한 결과, 국내에서는 CO, NO_x, PM과 관련된 기준을 설정하여 관리하고 있었다. 반면 미국은 PM의 발생에 따른 가시거리를 측정하여 PM 발생을 억제하고 있으며, 캐나다도 건조, 가열, 사용시설에서의 PM 발생에 대하여 기준을 설정하여 관리를 실시하고 있는데 국내 기준과 비교하여 사용시설의 기준치가 매우 낮은 것으로 나타났다(Pa *et al.*, 2011; Pa *et al.*, 2013). 또한 유럽 및 북미의 CO 및 NO_x에 대한 허용 기준은 일반 대기환경 기준에 적용받고 있는 것으로 조사되었다. 그러나 목재펠릿의 연소 배출물과 관련된 대기환경 기준은 목재펠릿 자체보다는 목재펠릿 연소기의 영향을 받는 것으로 조사되었다.

4. 목재펠릿 연소기의 배출물 허용기준 비교

목재펠릿의 연소 배출물과 관련된 규정으로 목재펠릿을 연료로 사용하고 있는 주택용 목재펠릿 보일러에 대한 법규가 국내외

적으로 시행되고 있다. 국내에서는 KSB 8901에서 58 kW 이하의 목재펠릿보일러에 대하여 배출되는 CO, NO_x, 매연농도에 대해 성능 관리를 하고 있으며(KS, 2017), 산림청은 이에 근거하여 주택용 펠릿보일러 보급사업을 실시하고 있다(KFS, 2018). 또한 전술한 바와 같이 산업용 규모의 목재펠릿 연소기에 대해서는 CO, NO_x, PM에 대한 규제치를 적용하여 관리하고 있다.

미국은 바이오매스 연소기에서 발생하는 배출물의 허용량에 대한 기준은 없는 것으로 조사되었다(Sjoding *et al.*, 2013). 그런데 미국의 바이오매스 연소기 가운데 상위 25%에 해당하는 연소기 용량과 배출물 양을 측정된 결과, CO 배출량은 스토브, 온수스토브, 보일러, 병합보일러 순이었으며, PM 배출량도 스토브, 병합보일러/보일러, 온수스토브 순으로 조사되었다(Burkhard and Russel, 2009). NO_x 배출량은 병합보일러, 온수스토브, 보일러에서 차이가 크지 않았으며, 스토브에서 가장 적은 것으로 조사되었다. 한편, 바이오매스 연료별 배출량을 살펴보면 장작연소기가 가장 높았으며, 목재칩 및 목재펠릿 간에는 차이가 없었다. 결과를 종합하면, 목재펠릿을 연료로 이용하는 연소기 가운데 스토브에서 상당량의 CO와 PM이 발생하고 있다.

유럽의 경우, 펠릿보일러에서 발생하는 배출물의 기준(EN 303-5)을 설정하여 펠릿 연소 시 발생하는 배출물로 인한 대기오염 가능성을 최소화하는 방안을 마련하였다(ECS, 2012). 내용을 보면, 연료의 투입방법(수동 및 자동)과 용량에 대하여 각각 기준을 설정하고 측정 결과에 따라 1-3등급까지 정하였으며, 3등급이 품질이 가장 우수한 펠릿보일러를 의미한다. 이 규격이 결정되기 전까지 유럽의 각국들은 펠릿보일러의 규격 및 기준을 가지고 있어 이에 따라 대기오염을 경감시키고 펠릿보일러의 품질을 향상시키는 방안으로 이용하였다. 예를 들면, 영국의 펠릿보일러 배출허용 기준으로 CO, 유기 가스형태 화합물(organic gaseous compound), PM에 대한 배출량을 최소화하는 방안으로 이용하였다(BSI, 2007). 이 기준을 보면, 보일러의 등급을 1-5등급으로 나누었으며, 5등급이 가장 고등급의 펠릿보일러를 의미한다.

펠릿보일러의 배출물 허용기준을 포함한 고체연료 및 펠릿보일러에서 발생하는 배출물에 대한 각국의 허용기준을 비교한 결과, 국내의 경우 펠릿보일러에서 배출되는 각 물질의 허용량에 대한 항목으로 CO, NO_x, PM 등에 대한 기준이 존재하였다. 반면, 목재를 연료로 많이 사용하는 독일, 스칸디나비아국 등의 EU 국가에서는 유기 가스형태의 화합물까지 기준에 포함되어 있다(Olsson *et al.*, 2003; SSCI, 2010; Schmidl *et al.*, 2011).

다음으로 국내의 PM의 허용기준을 비교한 결과, 국내에서는 PM₁₀에 대한 24시간 배출량을 측정하는 반면, 일본에서는 시간당 배출 허용기준을 설정하여 연소물질에 대하여 엄격하게 관리를 하고 있다. 한편, 북미, 호주 및 세계보건기구에서는 PM_{2.5}까지 기준을 설정하여 미세입자에 환경 유해성과 인체 위해성까지 고려하고 있는 상황이다(US-EPA, 2012). 국내에서도 이와 같은 해외 상황을 고려하여 PM₁₀과 함께 PM_{2.5}의 배출량도 배출물 허용기준에 포함시킬 계획으로 다양한 연구 및 자료수집 등을 통하여 배출기준 및 측정법 규정을 위한 관련 작업을 계속 진행시키고 있는 상황이다(Choi *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2011).

마지막으로 현재까지 조사된 각국의 PM 측정법을 보면, 국내에서는 대기오염공정시험법에 의거하여 굴뚝 배출가스 중의 TSP (total suspended particle) 양을 측정하고 있다(ME, 2017b), 미국은 EPA 201A 기준에 의거하여 국내 방법과 동일한 방법으로 PM(PM₁₀, PM_{2.5})에 대한 분석을 수행하고 있다(US-EPA, 2017). 유럽의 경우, 노르웨이에서는 Dilution tunnel method (NS 3058-2), 영국에서는 electrostatic dust filter method (BS 3841-1), 독일에서는 Heated filter method (DIN+)를 적용하여 PM을 측정하였으며, 이를 토대로 Residential solid fuel burning appliance - Emission test methods (DD CEN/TS 15883:2009)가 결정되어 현재 사용되고 있다(Qiu, 2013).

5. 결론

목질계 연료의 연소는 수증기와 이산화탄소 외에 CO, NO_x, SO_x, HC, VOC, PAH, PM 등과 같은 물질을 배출시킨다. 이 배출물은 인체 및 환경에 대한 유해성을 가지고 있으며, 해외사례 조사를 통하여 PM이 천식, 심폐질환 등을 일으키는 주요 원인으로 조사되었다. 그러나 목재펠릿과 같이 건조되어 있는 연료를 적절한 기술을 적용하여 연소할 경우 PM 배출의 정도는 조절이 가능한 것으로 조사되었다.

우리나라의 경우 주택용 및 산업용 목재펠릿 연소장치의 배출물의 안전성은 KS 및 대기환경보전법에서 허용 기준치를 설정하여 관리하고 있으며, 유럽 및 북미의 경우 목재펠릿의 연소에 의한 배출물만으로 규정하지 않고 전체적인 연소 배출물에 대하여 관리하고 있다. 목재펠릿 연소 시 발생하는 배출물에 대하여 현재 대기환경보전법에 명시되어 있는 적용 대상은 유럽 및 일본 기준과 차이가 없거나 약간 낮았으며, 북미 및 아시아의 기준보다는 높았다. 목재를 연료로 많이 사용하는 독일, 스칸디나비아국, 일본 등은 대체로 허용기준을 엄격히 설정하여 연소물질에 대하여 철저히 관리하고 있다.