



# 목재펠릿과 관련한 안전사고의 발생원인 및 예방책 - 연소 전을 중심으로

양 인<sup>1)</sup> · 이재정<sup>2)</sup> · 안병준<sup>3)</sup>\*

## Reasons of Safety Accidents Occurred with Regard to Wood Pellets and its Precautions against the Accidents - Prior to its Combustion

In Yang<sup>1)</sup> · Jaejung Lee<sup>2)</sup> · Byoung Jun Ahn<sup>3)</sup>\*

Received 31 May 2019 Revised 21 June 2019 Accepted 9 August 2019

**ABSTRACT** Over the last decade, the consumption and production of wood pellets have increased greatly both domestically and globally. Therefore, several safety concerns by producers and consumers, as well as environmental concerns have been brought steadily. This paper reviews the accidents from the safety issues and the potential human/environmental harm, and suggests precautions to prevent accidents or harm. In regard to the safety of wood pellets themselves, various dangerous situations or accidents, such as self-heating, off gassing, fire, explosion, mold/micro-toxins, and drifting-blowing dust, can occur. For example, three casualties from toxic gas, fire and explosion during the consumption and production of wood pellets in the European Union, have been reported since 2010. Therefore, an international meeting concerning the safety issues of wood pellets and its solutions was held for the first time in Austria in 2013. In South Korea, no casualties from the consumption and production of wood pellets have been reported, but the potential for casualties from the use of wood pellets increases. Therefore, it is important to manage wood pellets properly to minimize wood pellet-related accidents.

**Key words** Wood pellet(목재펠릿), Safety(안전성), Self heating(자연발열), Off gassing(외가스처리), Drifting dust(날림먼지)

### 1. 서론

목재펠릿은 목질계 바이오매스를 원료로 제조하는 청정 고체연료로서 높은 열효율과 용이한 운반 및 보관 등의 장점으로 현재 유럽연합과 북미를 중심으로 열병합발전소 또

는 화력발전소용 연료로 많이 사용되고 있으며, 그 생산량은 계속 증가할 것으로 예상된다<sup>[1]</sup>. 국내의 경우, 2009년부터 산림청 및 에너지관리공단의 목재펠릿용 보일러 보급 사업과 함께 생산을 시작한 이후, 계속 성장을 거듭하여 2018년에 18만 톤 이상의 목재펠릿이 생산되었으며, 그 시장 규모도 계속 증가할 것으로 예상된다<sup>[2]</sup>. 한편 국내 목재펠릿의 수요량 증가와 함께 해외로부터 수입되는 목재펠릿 양도 급속히 증가하고 있다. 예를 들면, 2018년 베트남, 말레이시아, 인도네시아, 러시아, 태국 등에서 약 300만 톤의 목재펠릿이 수입되어 유통되었다<sup>[3]</sup>. 또한 지난 2018년 산업통상자원부 고시 2018-130호 「신·재생에너지 공급의

- 1) Researcher, Bioenergy Team, Scion, New Zealand
- 2) Research Scientist, Department of Forest Products, Division of Wood Utilization, National Institute of Forest Science
- 3) Senior Researcher, Division of Forest Disaster Management Training, Forest Training Center, Korea Forest Service

\*Corresponding author: bjahn@korea.kr

Tel: +82-31-570-7353 Fax: +82-31-570-7317

무화제도 및 연료 혼합무화제도 관리·운영지침」 개정에 따라 미이용 산림바이오매스의 RPS(Renewable Energy Portfolio Standard) 가중치가 상향 조정 되었으며, 이로 인해 국내 목재펠릿 생산량이 상당히 증가할 것으로 예측 된다.

이와 같이 목재펠릿 사용량의 증가와 함께 생산자, 사용자 및 환경에 대한 안전성 문제가 유럽연합을 중심으로 2013년부터 계속 제기되고 있다<sup>[4]</sup>. 예를 들면, 2010년 이후 유럽에서 목재펠릿의 사용 및 제조에 있어 발생한 유독 가스, 화재, 폭발 등으로 3건의 인명피해 사건이 보고되었다. 이에 대한 논의를 위하여 2013년 3월 오스트리아의 Fugen에서 목재펠릿의 안전성 및 관련 정책, 해결방안 등에 대한 국제회의가 처음으로 개최되었으며, 이 회의를 통하여 여러 문제점 및 이에 대한 해결 방안이 제시되었다. 국내의 경우 목재펠릿의 사용 및 제조에 따른 인명피해 사례는 아직 보고되지 않고 있으나, 2018년 7월에 충북의 연간 30만톤의 목재펠릿 생산시설에서 분진폭발 화재가 발생한 바 있다. 정부의 RPS 가중치 조정에 따라 연간 10~30만톤 규모의 목재펠릿 제조기업이 등장하면서, 목재펠릿의 생산 및 제조 공정에서 발생할 수 있는 화재위험요소를 파악할 필요가 있다. 예를 들면, 목재펠릿 이용 및 보관시설에서 자연발열 및 산화에 의한 유독가스 발생과 이에 따른 인명 피해, 화재, 폭발, 날림먼지, 박테리아와 곰팡이와 같은 미생물 등의 발생이 일어날 수 있다.

따라서 본 연구는 국내외적으로 생산량 및 사용량이 급증하고 있는 목재펠릿에서 연소 전의 생산 및 보관 중에 안전과 관련하여 일어날 수 있는 여러 문제점(자연발열, 산화, 화재/폭발, 미생물, 날림먼지 등)에 대한 발생원인 및 해외 발생사례의 조사를 통하여 향후 목재펠릿과 관련하여 발생할 수 있는 안전사고 예방을 위한 규정 및 정책 수립의 기초자료로 제공하기 위하여 수행되었다.

## 2. 자연발열

자연발열(Self heating)은 어떤 곳에서 열을 주지 않아도 물질이 상온인 공기 중에서 자연히 발열하는 현상으로 자연발열의 직접원인으로는 분해, 산화, 발효 등을 들 수

있다<sup>[5]</sup>. 또한 자연발열은 유기체에서 수분의 표면 상승이동으로 발생하기도 하며, 따라서 밀폐된 공간 내에서 다양한 함수율의 유기체를 대량으로 보관할 경우 자연발열의 가능성이 높아진다. 이 외에 수분의 응축열도 자연발열을 가속시키는 인자로 알려져 있다<sup>[3]</sup>. 자연발열은 산화와 함께 유기체에서 스스로 가스를 발생(off-gas, 오프가스)시키는 원인으로 이에 따른 유독가스의 생성으로 인체 유해의 가능성을 가지고 있으며, 심지어 화재 및 폭발 위험성도 내포하고 있다.

현재 펠릿 제조에 대부분 사용되고 있는 목재는 탄소, 수소, 산소로 구성되어 있는 유기체이기에 자연발열이 발생하게 된다. 특히 목재 내에 소량 함유되어 있는 지방산과 레진산은 자연발열과 오프가스의 주원인으로 보고되었다<sup>[6]</sup>. 따라서 일정한 크기의 공간에서 보관되는 목재펠릿에서도 자연발열 현상이 일어날 수 있으며, 특히 높은 온도에서 압축되어 성형되는 관계로 제조된 직후 응축열에 의하여 자연발열의 가능성이 높아지게 된다. 목재펠릿의 자연발열은 펠릿 제조에 사용된 수종에 따라 차이가 있으며, 침엽수와 활엽수로 제조된 혼합 펠릿에서도 수종에 따른 함유성분의 차이로 자연발열 현상의 차이가 존재하게 된다. 이 외에 펠릿 제조에 사용된 원목의 산지, 수령, 성장조건, 벌채시기, 원목의 박피, 치핑, 건조 조건, 치핑된 원료의 보관 기간 및 조건 등도 자연발열에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 수피와 함께 생산된 펠릿은 박피한 목재로 제조된 펠릿과 비교하여 함수율이 동일할 경우 자연발열의 가능성이 높은 것으로 보고되어 이에 대한 주의 및 대비책이 필요한 것으로 언급되었다.

펠릿 제조조건이 목재펠릿의 자연발열과 오프가스에 대하여 미치는 영향을 보면, 생산 설비 및 펠릿 제조에 적용된 온도와 압력에 따른 영향도 있으나, 제조된 펠릿의 냉각 과정에서 받는 영향이 가장 큰 것으로 보고되고 있다. 즉 펠릿이 충분히 냉각되지 않은 상태에서 사일로에 보관될 경우 사일로 온도는 빠르게 상승하고 결과적으로 오프가스의 양은 증가하게 된다. 이에 대한 해결 방안으로 제조된 펠릿의 포장, 보관 또는 운송에 앞서 최소 7일 동안 실온에서 방치하는 것으로, 이와 같이 숙성시킨 펠릿의 표면 및 내부 온도는 일정하게 유지되고 함수율도 평형상태를 유지하게 되어 자연발열 및 오프가스의 가능성도 낮추고 결과적

으로 안전하게 펠릿을 사용할 수 있게 된다. 독일에서는 방치시간에 따른 펠릿의 숙성도(maturity)를 측정하여 펠릿의 품질을 평가하는 기준으로 사용하고 있으며, 이렇게 숙성시킨 펠릿의 경우 미세분 발생량도 감소하는 것으로 보고되었다. 유사한 예로 많은 단백질과 지방을 함유하고 있는 사료용 펠릿의 경우 수분의 응축과 미세분 발생량을 줄이기 위하여 펠릿의 온도를 외기 기온보다 5°C 이상이 되지 않도록 보관하는 것이 제안되었다. 따라서 대형으로 적재되어 보관되고 있는 펠릿은 숙성도 향상 및 대기 온도와 적절한 평형상태를 유지하기 위하여 사일로와 같은 대형의 보관 공간이 필요하며, 보관되는 펠릿의 양에 따른 사일로 크기의 조절을 통하여 펠릿에서 발생하는 열의 발생과 냉각(열의 분산) 정도를 맞추는 방안이 필요하다. 이 외에 목재펠릿의 자연발열은 외기의 습도 및 온도, 햇빛, 펠릿 보관장소 주변의 오염도 등과 같은 인자에 의하여 가속화될 수 있으므로 이에 대한 모니터링도 필요하다.

목재펠릿 내에서 발생하는 자연발열 정도를 감소시키는 방안으로 펠릿 제조에 사용된 원료(침엽수, 활엽수, 혼합, 반탄화 등)에 따른 자연발열의 경향과 이에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 연구가 향후 필요할 것으로 생각한다. 또한 펠릿의 성형과정에서 리그닌의 가소화와 숙성과정에서 펠릿 표면의 결정화에 의한 표면 광택도의 증가가 자연발열과 오프가스 발생에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되었으며, 아직 정확한 이유가 밝혀지지 않은 원료의 함수율이 펠릿의 품질과 자연발열에 미치는 영향 등에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

### 3. 산 화

산화는 어떤 물질이 산소와 반응하여 화학변화를 일으키는 것을 의미한다. 유기물은 산화되기 쉬우며, 여러 가지 원인에 의하여 산화가 일어나 여러 물질이 새롭게 생성된다. 산화는 자동산화와 폴리페놀 oxidase, lipoxygenase 등의 산화효소에 의한 경우가 주요 원인이다. 산화가 용이한 성분으로는 유지, 정유류, 비타민류, carotenoid, 폴리페놀류 등이 있으며, 빛, 천이금속, heme 색소 등에 의하여 촉진되는데 저온에서 저장하는 경우에도 산화를 완전히

방지하는 것은 불가능하다.

펠릿화된 바이오매스의 산화는 생산된 즉시 발생하지 않으나, 상온에서 시간이 지남에 따라 점차 산화하게 된다. 목재펠릿도 생산된 후 보관이 필요한 관계로 적절한 온도와 산소 공급에 의하여 산화가 일어난다. 일반적으로 목재펠릿은 산화가 일어남에 따라 여러 종류의 가스가 발생하게 되며, 이 가운데 인체에 유해하고 폭발의 위험성이 있는 일산화탄소, 호흡 곤란을 일으키는 이산화탄소, 폭발 및 인체에 유해한 메탄 등이 산화현상에 따른 대표적인 생성물이다.

2010년 이후 유럽에서 목재펠릿 사용에 따른 3건의 인명피해 사건이 보고되었는데, 이는 목재펠릿 저장 사일로에서 발생한 일산화탄소에 의한 피해로서 밝혀졌다. 먼저 독일에서 발생한 사고로서 펠릿 보관창고의 입구를 개방한 즉시 호흡곤란으로 의식 불명 상태가 된 후, 응급실로 후송 중에 사망하였다. 창고에 함께 들어간 동반자도 호흡곤란 증상을 일으켰으나, 응급실에 후송된 후, 추후 퇴원하였다. 사고 현장의 펠릿 저장고는 약 155톤의 목재펠릿을 저장할 수 있는 규모로, 약 700가구 정도가 사용 가능한 양의 목재펠릿을 보관하고 있었다. 다음으로 아일랜드에서 38세의 가장이 주택용 목재펠릿 보일러를 위한 7 톤 규모의 저장창고에서 사망한 사건으로 피해자의 부인과 동반자는 피해자를 창고로부터 안전하게 꺼낸 후 병원에서 응급 처치를 받았다. 마지막으로 스위스에서 28세의 임산부가 82m<sup>3</sup>(약 60가구 공급용)의 일반주택용 펠릿 저장 창고에서 사망한 사건이 보도되었다.

이상과 같이 펠릿 제조업체에서 생산되고 있는 목재펠릿은 대량으로 취급 및 보관되는 관계로 펠릿으로부터 발생하는 여러 유해가스가 생산자들에게 여러 문제를 일으킬 수 있으나, 아직 이에 대한 모니터링을 하는 방안은 없으며, 특히 보관/운송 시에 모니터링을 하는 방법은 거의 불가능한 상황이다. 현재 이를 방지하기 위하여 보관 중인 펠릿터미 안에 센서를 삽입시키는 모니터링 방법이 유럽에서 사용되고 있는데, 이 장비는 센서 내의 배터리 수명이 다하는 약 9년간 모니터링이 가능하며, 현재 시장에서 판매 중인 제품이다. 이 제품은 함수율과 펠릿터미 내의 온도를 연속적으로 측정할 수 있는 장비로서 평균 2-4m 및 최대 8m 내까지 측정할 수 있는 탐침대를 구비하고 있다. 또한 펠릿

더미 주위의 공기질(온도, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 상대습도) 측정을 통하여 펠릿더미 내의 공기질 변화 정도와 외부 환경의 영향에 대한 모니터링까지도 가능한 장비이다. 이 장비를 통하여 함수율 및 온도 수준 변이에 대한 전체적인 상황을 제공하고, 부분적으로 측정이 가능한 함수율의 경우 함수율의 불균일성에 대한 정보를 제공함으로써 수분이동 및 발산 열에 대한 측정도 가능하다. 최근 이 제품에 대한 새로운 기능이 부가되고 있으며, 100m<sup>3</sup> 또는 1,000톤 규모에 적합한 탐침대와 함께 휴대용으로 개발도 진행되고 있다. 또한 상기 장비에 펠릿 주위의 공기를 측정하는 설비를 조합한 제품의 디자인까지 제안된 상황이다.

소형 펠릿 보관창고의 안전성 확보 방안으로 가정용 및 500kW 이하의 설비를 보유한 펠릿 제조업체에서 필요로 하는 소규모 펠릿 보관창고의 디자인과 관련된 가이드라인은 현재까지 없으며, 이와 관련된 제품의 개발 및 판매가 전혀 이루어지지 않고 있는데 이는 목재펠릿 제조업체로부터 지속적인 필요성 제기가 부족하고, 현 수준에서 목재펠릿으로부터 일산화탄소 방출, 폭발 위험성을 알 수 있는 수준에 대한 안전성에 대한 관심 부족이 가장 큰 이유라 할 수 있다. 이에 대한 해결책으로, 현재 European Pellet Council에서는 DEPI, Austrian ONorm, 스칸디나비아국의 관련자들로부터 여러 제언과 관련 사례가 포함되어 있는 정보 및 문헌을 수집하고 있다. 또한 펠릿 제조업체에서 제공되고 있는 정보 및 자료, 그리고 펠릿의 발열에 따라 인명사건이 일어난 정부에 의하여 설정된 법규를 토대로 새로운 해결방안이 수정되고 있는 단계이다.

## 4. 화재 및 폭발

### 4.1 화재

목재펠릿의 생산 현장에는 톱밥, 미세 목분과 같은 인화물질, 펠릿에서 발생하는 일산화탄소 및 비휘발성 탄화수소와 같은 산화제, 그리고 누전, 전기램프, 기계적 마찰/결함에 의한 스파크와 같은 점화/발화체 등과 같이 화재를 일으키는 3 요소가 모두 존재하기 때문에 화재의 가능성이 매우 높다<sup>[7]</sup>. 특히 대량으로 펠릿을 보관하는 사일로에서 발생하는 일산화탄소 및 비휘발성 탄화수소는 화재의 주요 원

인이 된다. 예를 들면, 펠릿의 산화에 의하여 발생하는 일산화탄소의 농도가 사일로의 상부에서 2% 이상일 경우 화재의 가능성이 매우 높은 것으로 조사되었다<sup>[8]</sup>. 또한 밀폐된 사일로에서 산소의 공급이 발화에 큰 역할을 담당하므로 공기 흐름의 조절과 환기구의 밀폐가 발화 억제에 매우 중요한 역할을 한다. 반면 소형 펠릿용 사일로의 화재는 주로 외부적인 요인에 의하여 발생하는 경우가 많으므로 이에 따른 적절한 관리만 이루어진다면 화재의 위험성을 크게 낮출 수 있다.

목재는 일반적으로 유사한 고체 연료인 석탄보다 높은 자연발열율, 낮은 인화온도 그리고 높은 폭발 위험성 지수를 나타내고 있어 화재의 위험성이 높은 편이다<sup>[7]</sup>. 또한 펠릿 제조를 위하여 원료로 사용되고 있는 원목 또는 제재부산물 등에 대한 파쇄공정이 필요한 관계로 파쇄기를 사용하게 되며, 파쇄기의 사용에 의한 상당량의 동력 사용으로 높은 열과 미세분의 발생으로 화재의 위험성을 더욱 높이는 요인이 된다. 따라서 목재펠릿을 보관하는 사일로에서 화재가 발생할 경우 진화를 위하여 다양한 방안이 제시되고 있는데, 첫 번째는 사일로의 상부에서 발생한 화재의 경우 사일로 내부 깊숙이 화염의 전달을 피하고 사일로 지붕의 붕괴를 막기 위하여 상부를 직접 진화하거나 소화물질을 사일로 상부에서 주입하는 방안이 있다. 두 번째로 사일로 하부에서 질소가스를 주입할 경우 화염의 전달은 경감되나, 이를 위하여 질소가스 주입구가 필요하며 이와 같은 설비는 대형 사일로에서만 경제성을 보유하게 된다. 세 번째는 사일로 상부에서 소화발포제를 사용하는 것으로 이 방안은 화재 진화에 매우 효과적이나 소형 사일로에서만 적합한 것으로 보고되었다.

한편 스웨덴의 Silo Protection사는 화재 및 구조 서비스를 위한 단체인 Swedish Civil Contingencies Agency와 함께 10년 전부터 사일로의 화재 예방을 위한 여러 방안에 대하여 연구 및 적용을 추진하고 있으며, 2012년 화재 예방 방안에 대한 정보가 담긴 책자를 출간하였다. 이에 대한 내용을 다른 웹사이트를 보면, 다양한 종류의 목재펠릿 사일로에서의 화재 예방책을 제시하였으며, 목재펠릿용 사일로 외에 다른 용도의 사일로까지 확대시키는 방안도 제시하였다<sup>[9]</sup>. 이렇게 제시된 방안은 전문가의 연구, 화재로부터의 경험, 업체의 축적 자료 등을 근거로 작성한 것이다.

## 4.2 폭발

목재펠릿을 보관하는 사일로의 종류에는 소형 철재 사일로, 콘크리트 타워 사일로, 대형 사일로 등이 있는데, 사일로의 화재는 폭발의 위험성을 동시에 수반한다. 예를 들면, 화재의 진행과 함께 사일로 내의 산소농도가 매우 낮아지고, 화재 진압을 위하여 사일로의 천장을 개방하였을 때 역기류에 의하여 폭발을 일으키게 된다. 그 폭발의 위험성은 사일로 내에 보관된 펠릿에서 발생하는 미세분진의 양에 따라 차이가 있다.

사일로 내의 화재에 따른 폭발을 예방하기 위하여 제시된 방안으로는 첫 번째가 사일로를 건축할 때, 온도 및 가스 발생량의 측정을 위한 모니터링 시스템과 발생한 가스를 적절히 분산시키는 시스템을 설치하는 것이다. 두 번째는 펠릿더미 내에 무선센서를 삽입시키는 방안으로 어느 정도 폭발을 예방할 수 있으나, 무선센서의 위치와 무선센서로부터 발생하는 신호가 펠릿에 의하여 방해될 수 있다는 문제점이 있다. 세 번째는 중앙 가스 분석기와 연결된 온도 센서 케이블이 있는 호스를 사용한 흡입시스템을 사용하는 방안이다. 네 번째는 사일로 내부에서 소화 물질의 배출도 하나의 방안으로 사용할 수 있으며, 소형 사일로는 긴 호스가 달린 소화기를 사용하고, 대형 사일로는 여러 곳의 배출구에서 소화물질을 적절히 분배시키는 방안이다. 마지막으로 소방대원들에 의한 사일로의 개방을 막고 cutting extinguisher(철재 또는 콘크리트 벽체를 뚫고 들어갈 정도의 수압을 가진 장비)를 사용하는 것으로 사일로 내부의 펠릿을 모두 배출하지 않고 소형 사일로의 화재 및 폭발 위험성을 줄일 수 있는 가장 적당한 방안으로 제시되었다. 이 외에 공기의 혼입을 방지하기 위하여 사일로의 모든 배출구 폐쇄, 사일로 상부에 펠릿의 산화현상에 의하여 발생하는 가스의 제거를 위한 배출구 설치, 사일로 내의 공기 혼입을 방지하기 위한 체크 밸브 설치, 분진폭발의 위험성이 있는 사일로 상부에서의 난류 발생을 억제시키기 위하여 사일로의 하부에서 가스를 유입시키는 방안 등이 제시되었다. 또는 소화제로 CO<sub>2</sub>의 사용시 CO<sub>2</sub>의 높은 비중으로 사일로 상부에서 가스 주입이 필요하나, 손실이 많으므로 사일로 상부의 폭발 위험성이 높을 경우에만 사용하는 방안과 스팀을 주기적으로 주입하는 방안도 소개되었다.

## 5. 미생물 발생

펠릿은 목질계 바이오매스를 이용하여 대부분 제조되고 있어 적절한 생육환경만 제공된다면 세균, 효모, 곰팡이 등과 같은 미생물에 의하여 오염이 될 가능성이 있다. 대부분의 미생물을 위한 최적 생육조건은 15~35°C의 온도, 60%의 상대습도, 산소, 적당한 숙주 등으로 목재펠릿의 경우, 상기와 같은 외기조건이 제공된다면 목재라는 숙주에 여러 미생물이 쉽게 생육할 가능성이 있다. 따라서 목재펠릿을 포함하여 다양한 종류의 고체 바이오연료에 대한 미생물 발생 가능성을 조사한 Madsen 등(2004)의 연구 결과는 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

실험을 위하여 공시재료로 28.0±0.3% 및 34.7±0.2% 함수율의 목재칩, 11.1±0.1%, 12.1±0.2%, 10.7±0.1% 함수율의 밀짚펠릿, 10.5% 함수율의 목재 브리켓, 9.4±0.1% 함수율의 목재펠릿을 사용하였다. 이렇게 준비된 공시재료를 25°C의 온도 및 60% 상대습도로 유지된 incubation room에 일정기간 보관한 후, 원통형의 회전기에 넣고 7 rpm의 속도로 5분간 회전하였다. 회전을 완료한 후, 회전기 내의 공기를 포집하여 bacterial peptidoglycan의 전구물질인 muramic acid, gram-negative bacteria의 전구물질인 endotoxin, fungal biomass의 전구물질인 ergosterol의 양을 측정하였다. 또한 포자의 확인을 통하여 박테리아 및 곰팡이의 전체 수량도 조사하였다.

실험 결과를 요약하면, 회전기 내에서 포집된 박테리아의 전구물질인 muramic acid 및 endotoxin이 밀짚, 목재칩, 목재펠릿, 목재브리켓 순으로 조사되어 목재펠릿이 밀짚펠릿과 목재칩에 비하여 박테리아 발생량이 적은 것으로 조사되었다. 한편 목재펠릿에서는 박테리아가 전혀 검출되지 않았다. 또한 회전기 내에서 포집된 공기에서 곰팡이의 전구물질인 ergosterol 양은 밀짚펠릿, 목재펠릿, 목재칩, 목재브리켓 순으로 조사되었으나, 곰팡이는 목재펠릿에서 검출되지 않았다.

이 연구 결과를 종합하면, 생산되어 보관 중인 목재펠릿 내에서 박테리아와 곰팡이와 같은 미생물이 생육할 가능성은 매우 낮은 것으로 조사되었다. 이는 목재펠릿이 압밀화 과정을 통하여 생산되는 관계로 수분흡착율이 낮아 보관하고 있는 펠릿 자체가 낮은 함수율을 유지하게 되어 나타난

결과라 생각한다. 따라서 목재펠릿 자체에서 미생물 발생에 따른 인체 위해성은 매우 낮을 것으로 생각한다. 그러나 여름철 장마기간과 같이 온도가 높고 습도가 매우 높은 조건에서 목재펠릿을 보관할 경우, 미생물의 생육을 위한 최적의 환경을 제공할 수 있으므로 이에 대한 특별한 주의가 필요하다. 따라서 장마기간 중에는 어느 정도 건조한 곳으로 이동시켜 보관하는 것도 고려해야 할 것으로 생각한다.

## 6. 날림먼지

바람에 의하여 지표면으로부터 공중으로 날리는 미세먼지를 날림먼지라 한다. 발생한 날림먼지가 서 있는 사람의 눈높이 정도의 수평시정을 감소시키지 않을 경우 땅날림먼지(drifting dust)라 하며, 눈높이 이상으로 불어올라가 수평시정에 방해가 되는 경우를 높날림먼지(blowing dust)라 한다<sup>[11]</sup>. 현재 날림먼지와 관련된 제한 기준은 환경부에서 공포한 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”에서만 적용받고 있으며, 이 법규에서는 건설폐기물의 수집, 운반, 임시 보관장소, 중간처리 시설 등에 국한되어 있다<sup>[12]</sup>.

목재펠릿의 경우, 생산과정 및 운송, 보관 중에 미세분배 의한 날림먼지가 발생할 가능성이 충분히 높다. Madsen 등(2004)은 이와 관련하여 연구를 수행하였으며, 실험 방법 및 결과를 요약하면 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

공시재료로 28.0±0.3% 및 34.7±0.2% 함수율의 목재칩, 11.1±0.1%, 12.1±0.2%, 10.7±0.1% 함수율의 밀짚펠릿, 10.5% 함수율의 목재 브리켓, 9.4±0.1% 함수율의 목재펠릿을 사용하였다. 이렇게 준비된 공시재료를 원통형의 회전기에 넣고 7rpm의 속도로 5분간 회전시킨 후, 30초 간격으로 회전기 내의 공기를 포집하여 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)의 발생량을 측정하였다. 이때 발생량을 0.75µm < PM<sub>2.5</sub> < 3.5µm과 0.75µm < PM<sub>10</sub> < 10µm로 나누어 측정하였다.

전체적인 미세먼지 발생량은 밀짚펠릿, 목재펠릿, 목재칩-1과 브리켓, 목재칩-2 순으로 조사되었다. 그러나 미세먼지 크기에 따른 시간별 미세먼지 발생량 결과를 보면, 목재펠릿에서 발생하는 PM<sub>2.5</sub>는 회전 후 30~60초 간격에서 급속히 증가하다가 120초부터는 안정화되었으며, 목재

칩-1보다 발생량이 많을 뿐 다른 고체 연료에 비하여 적은 양이 발생하였다. 한편 목재펠릿에서 발생하는 PM<sub>10</sub>은 회전시간에 따른 발생량의 차이가 나타나지 않았으며, 밀짚펠릿보다는 적은 발생량 그리고 목재칩과 유사한 양의 미세먼지가 발생하였다.

결과를 종합하면, 목재펠릿의 생산, 보관, 운송 과정에서 발생하는 미세분의 발생량은 매우 적은 것으로 나타났다. 그 이유는 생산과정 중에 발생하는 미세분의 경우 흡입 펌프를 이용하여 최소로 감소시킬 수 있으며, 보관 중인 목재펠릿은 일반적으로 사일로 내에서 보관되어 날림먼지 발생에 대한 가능성은 매우 낮았으며, 운송 또는 유통되고 있는 목재펠릿은 적절하게 포장되어 있는 관계로 날림먼지에 대한 인체 및 환경 유해성은 현시점에서 고려할 필요가 없을 것으로 판단된다.

## 7. 국제표준화기구 동향

국제표준화기구(ISO)의 고형바이오연료 기술위원회(TC 238 Solid Biofuels)는 목재펠릿을 비롯한 고형바이오연료의 규격과 품질기준에 대한 국제표준을 관리하고 있다. 최근 유럽을 중심으로 목재펠릿의 제조·사용시설에서 대규모 화재가 지속적으로 발생되면서, 목재펠릿의 운반·저장에 관한 안전규정의 논의가 활발히 이루어지고 있다. 해당 기술위원회에서는 2014년부터 목재펠릿의 안전성에 대한 작업단을 구성하여 목재펠릿의 안전성에 대한 국제표준을 준비하여 2018년 고형목재펠릿의 안전성(ISO 20023:2018)을 발표하였다. 해당 표준에서 주거용 혹은 소규모 산업용 목재펠릿의 안전한 운송과 대용량 저장을 위한 필요 사항들을 규정하고 있으며, 주요 내용은 목재펠릿을 취급하는 중 마모와 손상으로 인해 화재를 유발하는 분진 발생을 최소화하기 위한 방법들이다. 이에 더불어 운반장비 및 저장시설이 화재위험 및 작업자 안전을 위해 갖추어야 할 규정들을 제안하고 있다.

상기 기술위원회는 2019년 5월 서울에서 개최된 제11회 정기총회에서 상업용 및 산업용 목재펠릿과 목재칩의 안전에 관한 규정 신설에 대해 논의하였다. 또한 국제표준화기구에서 활발한 논의를 거쳐 개발 중인 규정은 목재펠릿 저

장시설의 배가스와 산소결핍 측정법, 목재펠릿의 자가발열 측정방법 등이 있다.

## 8. 결론

목재펠릿의 자연발열은 펠릿이 충분히 냉각되지 않은 상태에서 사일로에 보관될 경우 사일로 온도는 빠르게 상승하고 결과적으로 오프가스의 양이 증가하면서 발생한다. 제조된 목재펠릿의 포장, 보관 또는 운송에 앞서 최소 7일 동안 실온에서 방치할 경우 펠릿의 표면 및 내부 온도는 일정하게 유지되고 함수율도 평형상태를 유지하게 되어 자연발열 및 오프가스의 가능성도 낮추고 결과적으로 안전하게 펠릿을 사용할 수 있게 된다. 목재펠릿의 생산 현장에는 인화물질, 산화제, 점화/발화체 등과 같이 화재를 일으키는 3요소가 모두 존재하기 때문에 화재의 가능성이 매우 높다. 특히 대량으로 펠릿을 보관하는 사일로에서 발생하는 일산화탄소 및 비휘발성 탄화수소는 화재의 주요 원인이 된다. 반면 소형 펠릿용 사일로의 화재는 주로 외부적인 요인에 의하여 발생하는 경우가 많으므로 이에 따른 적절한 관리만 이루어진다면 화재의 위험성을 크게 낮출 수 있다. 한편 목재펠릿을 보관하는 사일로에서 화재가 발생하면 사일로 내의 산소농도가 매우 낮아지고, 화재 진압을 위하여 사일로의 천장을 개방하였을 때 역기류에 의하여 폭발을 일으키게 된다. 사일로의 화재 및 폭발 위험성을 줄일 수 있는 가장 적당한 방안으로 사일로의 개방을 막고 cutting extinguisher를 사용하는 것이 제시되었다. 펠릿은 목질계 바이오매스를 이용하여 대부분 제조되고 있어 적절한 생육환경만 제공된다면 세균, 효모, 곰팡이 등과 같은 미생물에 의하여 오염이 될 가능성이 있다. 그러나 목재펠릿이 압밀화 과정을 통하여 생산되는 관계로 수분흡착율이 낮아 보관 중에 있는 펠릿 자체는 낮은 함수율을 유지하게 되며 따라서 미생물이 생육할 가능성은 매우 낮은 것으로 조사되었다. 그러나 장마기간과 같이 온도가 높고 습도가 매우 높은 조건에서 목재펠릿을 보관할 경우, 미생물의 생육을 위한 최적의 환경을 제공할 수 있으므로 이에 대한 특별한 주의가 필요하며, 건조한 곳으로 이동시켜 보관하는 방안도 고려해야 할 것이다. 다음으로 목재펠릿의 생산과정 및

운송, 보관 중에 미세분에 의한 날림먼지 발생에 대한 가능성을 충분히 보유하고 있으나, 문헌 조사를 통하여 미세분의 발생량은 매우 적은 것으로 나타났다. 그 이유는 생산과정 중에 발생하는 미세분의 경우 흡입펌프를 이용하여 최소로 감소시킬 수 있으며, 보관 중인 목재펠릿은 일반적으로 사일로 내에서 보관되어 날림먼지 발생에 대한 가능성은 매우 낮았으며, 운송 또는 유통되고 있는 목재펠릿은 적절하게 포장되어 있는 관계로 날림먼지에 대한 인체 및 환경 유해성은 현시점에서 고려할 필요가 없을 것으로 판단된다. 결과를 종합하면, 목재펠릿 자체의 안전성과 관련하여 자연발열, 산화, 화재 및 폭발, 미생물, 날림먼지가 발생할 수 있으나, 본 총설에서 제시한 방법에 따라 적절한 관리와 예방을 한다면 안전사고의 발생 가능성을 최소화할 수 있을 것으로 생각한다.

## References

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2016, "Renewables 2015 - global status report 2015", REN 21, Paris.
- [2] Forest Biomass Energy Association, 2019, "Status of domestic wood pellets produced in Korea", <http://www.biomassenergy.kr>.
- [3] Forest Biomass Energy Association, 2019, "Status of wood pellets imported from abroad", <http://www.biomassenergy.kr/>.
- [4] European Biomass Association, 2013, "First International Workshop on Pellet Safety", AEBIOM, Brussels.
- [5] Luangwilai, T., Sidhu, H.S., Nelson, M.I., and Chen, X.D., 2010, "Modelling air flow and ambient temperature effects on the biological self-heating of compost piles", *Asia-Pacific J. of Chem. Eng.* 5(4), 609-618.
- [6] Curci, M.J., 2010, "Procurement, process, and storage techniques for controlling off-gassing and pellet temperatures", [http://pelletheat.org/wp-content/uploads/2010/08/Off\\_gassing\\_study\\_Curci\\_2010.pdf](http://pelletheat.org/wp-content/uploads/2010/08/Off_gassing_study_Curci_2010.pdf).
- [7] Mattsson, M., 2013, "Prevention of fires and dust explosions within the biomass handling process", 4th Biomass Pellets Trade and Power, Seoul.

- [8] European Pellet Council, 2013, “First international workshop on pellet safety”, EPC, Brussels.
- [9] Swedish Civil Contingencies Agency, 2017, “MSB - Swedish Civil Contingencies Agency”, SCCA, Karlstad.
- [10] Madsen, A.M., Martensson, L., Schneider, T., and Larsson, L., 2004, “Microbial dustiness and particle release of different biofuels”, *Ann. Occup. Hyg.* 48(4), 327-338.
- [11] Koo, J.G., Kang, M.Y., and Seo, Y.C., 2009, “Comparative study on the control technologies of fugitive dusts and noise of construction project in Korea”, *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment J.* 9(1), 55-61.
- [12] Ministry of Environment, 2017, “Clean Air Conservation Act”, ME, Sejong.