

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성 평가

서동현·최이락·정기혁·고윤현·김천동

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 평가기간 2025년 05월 19일~ 2025년 08월 08일
- 핵심단어 목재펠릿, 바이오매스, 분진폭발, 화재·폭발
- 평가과제명 목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성 평가

1. 평가 배경

21세기 들어 신·재생에너지의 등장과 더불어 산업계에서는 수소, 암모니아 등, 그간 대량 취급 사례가 없었던 물질들을 사용하기 시작하였다. 목재펠릿 또한 2014년 이전만 하더라도 국내 산업계에서 사용하는 경우를 찾아보기 힘들었다. 하지만 현재 우리나라는 독일, 일본에 이어 목재펠릿 세계 3위 사용국이 되었다. 이런 목재펠릿의 경우 기존의 톱밥이나 목재칩을 건조, 분쇄, 성형 공정을 거쳐 제조하므로 상대적으로 입도가 작을 수밖에 없다. 따라서 분진폭발, 자연발화 등 화재·폭발 위험성에 있어서 기존의 목재, 석탄 계열 분진과는 차이가 있을 것으로 예상되어 위험성 평가를 실시하였다.

2. 주요 평가 내용

1) 사고사례 검토

21세기 이전부터 목재펠릿은 목재 자원이 풍부한 미국, 캐나다 등에서는 화석연료와 유사한 형태로 사용되어 왔다. 그 결과 목재펠릿 제조, 운반, 취급, 저장 과정에서 발생한 다양한 화재·폭발 사고사례를 확보할 수 있었다. 이런 사고를 집계한 결과 목재펠릿은 분진폭발, 자연발화, 마찰화재, 질식·중

독, 가스폭발 등의 위험이 있는 것으로 집계되었다.

2) 분진폭발 위험성

목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성을 평가하고자, 목재펠릿 제조소와 목재펠릿 전소 발전소에서 시료를 확보하여, 분진폭발 특성에 대해서 시험을 실시하고, 목재 분진, 무연탄 분진, 유연탄 분진과 비교를 통해서, 상대적 위험성을 검토하였다. 분진폭발 위험성에 있어서는 입도가 작은 목재펠릿 분진이라고 해서 목재 분진 보다 위험하다는 결론을 도출 할 수 있는 것은 아니었다. 다만, 목재 계열 분진 자체가 석탄 계열 분진보다 겉보기 밀도가 작고, 분진폭발 압력상승속도와 분진운의 최소 점화 온도에 있어서 상대적으로 위험한 점을 확인할 수 있었다.

3) 질식·중독, 가스폭발 및 자연발화 위험성

그간 연구된 문헌자료 검토 결과에 따르면, 목재펠릿 뿐만 아니라, 목재의 경우 유산소 호흡, 미생물 대사, 화학적 산화 과정에서 발생한 이산화탄소, 일산화탄소, VOC로 인해서 질식·중독 및 가스폭발 사고가 발생한다. 그리고 이런 유산소 호흡, 미생물 대사, 화학적 산화가 자연발화까지 이어지면서 화재 사고가 발생하는 것으로 검토되었다.

4) 마찰로 인한 화재 위험성

마찰화재의 경우 직접적인 목재의 마찰 보다는, 주로 기계적인 마찰에 의해서 가열된 표면에 목재펠릿 분진운이나 목재펠릿이 직접 노출되면서 발생하는 것으로 판단되었다. 따라서 정기적인 동력계통 설비의 점검과 더불어 화재 상황에 대응할 수 있는 대책 마련이 필요한 것으로 판단하였다.

3. 연락처

- 평가책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 위험성시험부 연구위원 정기혁
 - ☎ 042) 869. 0333
 - E-mail : nicekihyuk@kosha.or.kr

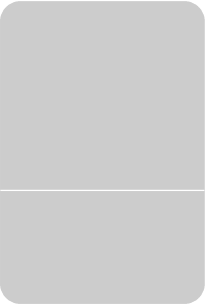


목 차

I. 서론	1
1. 배경 및 목적	3
2. 평가 범위 및 내용	8
3. 위험성 평가 대상 물질	9
II. 목재펠릿의 종류와 제조 및 발전 공정	11
1. 목재펠릿의 종류	13
2. 목재펠릿 제조 및 발전 공정	15
III. 화재·폭발 사고사례	19
1. 국내 사고	21
2. 해외 사고	23

3. 사고사례 분석	29
IV. 시험장비 및 방법	31
1. 입도분석 시험	33
2. 분진폭발 특성 시험	37
3. 발화 특성 시험	42
V. 시험 결과	49
1. 입도분석 시험 결과	51
2. 분진폭발 특성 시험 결과	62
3. 발화 특성 시험 결과	72

VI. 결과 고찰	83
1. 분진폭발 위험성	85
2. 질식·중독, 가스폭발 및 자연발화 위험성	96
3. 마찰로 인한 화재 위험성	109
VII. 결론	113
참고문헌	119
부록. 목재·석탄계열 분진의 물리적 특성에 대한 문헌 조사 결과	125



표목차

〈표 I-1〉 국내 신·재생에너지 발전 형태와 비율	5
〈표 II-1〉 국내 목재펠릿 규격·품질관련 주요 기준	14
〈표 III-1〉 최근 10년간 산업재해 중 목재펠릿으로 인한 화재·폭발 사고	21
〈표 III-2〉 목재펠릿 화재·폭발 사고 언론검색 결과('25.05월 기준)	22
〈표 III-3〉 2023년 세계 각국의 목재펠릿 사용량	23
〈표 III-4〉 2023년 세계 각국의 목재펠릿 생산량	23
〈표 III-5〉 2021년 미국 내 가연성 분진으로 인한 화재·폭발 사고사례	25
〈표 III-6〉 최근 5년간 미국에서의 목재펠릿 관련 화재·폭발 사고사례	25
〈표 III-7〉 최근 6년간 일본에서의 목재펠릿 발전소 관련 화재·폭발 사고사례	26
〈표 III-8〉 2000년 ~ 2018년 세계 각지의 목재펠릿 사고사례(참고자료 인용) ..	27
〈표 III-9〉 사고 발생 형태별 분석 결과	29
〈표 III-10〉 사고 발생 설비	30
〈표 III-11〉 목재/목재펠릿으로 인한 화재·폭발 사고의 주요 발생 형태	30
〈표 IV-1〉 입도분석 시험 방법의 종류	33
〈표 IV-2〉 레이저 회절 입도분석 장비 사양	34
〈표 IV-3〉 디지털 현미경 입도분석 장비 사양	35
〈표 IV-4〉 주사전자현미경 사양	36
〈표 IV-5〉 20리터 구형 시험 장비 사양	38

〈표 IV-6〉 최소점화에너지 측정 장비 사양	41
〈표 IV-7〉 자동발화점 측정 장비 사양	43
〈표 IV-8〉 축열저장시험 장비 사양	44
〈표 IV-9〉 열중량 분석 장비 사양	46
〈표 IV-10〉 시차주사열량계 장비 사양	48
〈표 V-1〉 입도분석 시험 결과	53
〈표 V-2〉 겉보기 밀도 측정 결과	57
〈표 V-3〉 분진 폭발압력 측정 결과	64
〈표 V-4〉 BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급	65
〈표 V-5〉 분진 폭발압력상승속도 속도 측정 결과	66
〈표 V-6〉 분진 폭발하한농도 측정 결과	68
〈표 V-7〉 자동발화점 측정 결과	72
〈표 V-8〉 열중량 분석 결과	77
〈표 V-9〉 함수율과 회분량 비교	80
〈표 V-10〉 시차주사열량계 측정 결과	81
〈표 VI-1〉 목재의 주요 구성 성분	96
〈표 VI-2〉 목재 성분의 호기성·혐기성 분해	101



그림목차

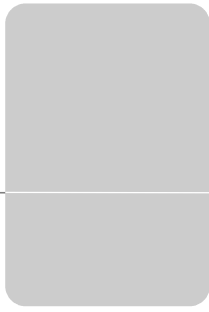
[그림 I-1] 목재펠릿 국내 생산/수입량	7
[그림 I-2] 위험성 평가 대상 시료	9
[그림 II-1] 목재펠릿 제조 공정	18
[그림 IV-1] 레이저 회절 입도분석 장비 사진	34
[그림 IV-2] 주사전자현미경 사진	36
[그림 IV-3] 20리터 구형 시험 장비 사진 및 설명	39
[그림 IV-4] Minor 3.0 시험 장비 사진 및 설명	41
[그림 IV-5] 자동발화점 측정 장비 사진	43
[그림 IV-6] 축열저장시험 장비 사진	45
[그림 IV-7] 열중량 분석 장비 사진	46
[그림 IV-8] 시차주사열량계 사진	48
[그림 V-1] 시료A, 시료B에 대한 입도분석 결과 비교	53
[그림 V-2] 시료A, 시료B에 대한 입도분석 결과	54
[그림 V-3] 시료C, 시료D에 대한 입도분석 결과	55
[그림 V-4] 저배율 현미경 촬영 사진	56
[그림 V-5] 시료A, 시료B, 시료C, 시료D의 주사전자현미경 촬영 결과	59
[그림 V-6] 시료A, 시료B, 시료C, 시료D의 주사전자현미경 촬영 결과 주요 부위	60
[그림 V-7] 일반적인 목재 조직의 구성	60
[그림 V-8] 시료A의 주사전자현미경 촬영 사진 확대 결과	61
[그림 V-9] 시험 결과 설명(시간에 따른 압력변화)	63

[그림 V-10] 분진폭발 압력 측정 결과 비교	64
[그림 V-11] 시료별 폭연지수 비교	67
[그림 V-12] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 60 ms)	70
[그림 V-13] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 90 ms)	70
[그림 V-14] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 120 ms)	71
[그림 V-15] 시료B의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 90 ms)	71
[그림 V-16] 축열 저장 시험 결과	76
[그림 V-17] 자기발열률 환산 결과	76
[그림 V-18] 시료A의 열중량 분석 결과	78
[그림 V-19] 시료B의 열중량 분석 결과	78
[그림 V-20] 시료C의 열중량 분석 결과	79
[그림 V-21] 열중량 분석 결과(공기 조건) 그래프 비교	81
[그림 V-22] 시차주사열량계 분석 결과	82
[그림 VI-1] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최대폭발압력 자료 검토 결과	87
[그림 VI-2] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 폭발압력최대상승속도 자료 검토 결과 ..	89
[그림 VI-3] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 폭발하한농도 자료 검토 결과	90
[그림 VI-4] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최소점화에너지 자료 검토 결과	91
[그림 VI-5] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최소 점화 온도 자료 검토 결과	93
[그림 VI-6] 일본 아이치현 목재펠릿 혼소 화력발전소 사고 영상(CBC뉴스 사진 인용)	95
[그림 VI-7] 유기 성분 추출 시험 결과	97

[그림 VI-8] 가스 발생량 측정 결과	103
[그림 VI-9] 자동발화점 문헌자료 비교 결과	105
[그림 VI-10] 역청탄과 열중량 분석 결과 비교	106
[그림 VI-11] BAM 마찰감도 시험 장비	109
[그림 VI-12] 아이치현 화력발전소 분진폭발 사고 모사 그림	112

I. 서론

.....



I. 서론

1. 배경 및 목적

1) 신·재생에너지와 목재펠릿 시장 전망

바이오매스를 대표하는 연료, 목재펠릿에 대해서 이해하기 위해서는 무엇보다 신·재생에너지 시장을 먼저 이해해야 한다. 실제로 우리의 삶에서 많은 부분들이 ‘그린’으로 대체되어 가고 있어 많이들 이해하고 있겠지만, 신·재생에너지 시장 상황이 어떠한지를 이해해야, 목재펠릿을 왜 사용할 수밖에 없는지, 그리고 앞으로 목재펠릿의 국내 사용량은 어떻게 변화할지 이해할 수 있다.

먼저 신·재생에너지가 필요한 기업은 크게 두 가지 형태의 기업이라고 할 수 있다. 하나는 RPS(Renewable portfolio standard, 신·재생에너지 공급 의무화 제도) 대상 발전사업자이고, 또 하나는 RE100(Renewable energy 100%) 참여 기업이다. 2012년부터 시행된 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 따라 발전설비 기준 500 MW 이상의 발전사업자의 경우에는 RPS 대상이 된다. 시행 당시에는 신·재생에너지 공급의무 비율이 2.0% 이상이였지만, 단계적으로 상향 조정되면서 2025년에는 14%, 2030년에는 25% 이상을 신·재생에너지로 전기를 공급해야 한다.

RE100은 The climate group과 CDP(Carbon disclosure project)라는 국제 환경 비영리 단체에서 추진하는 캠페인으로 참여하는 기업은 늦어도 2050년까지는 사용하는 모든 에너지를 신·재생에너지로 대체한다는 캠페인이다. 참여 기업이 자발적으로 사용 에너지를 ‘신·재생에너지 100%로 전환’하는 목표 연도를 설정하는 방식이라서 기업마다 목표 달성 연도가 다르지만, 2025년 기준으로는 목표 달성 평균 연도는 2028년이라고 한다¹⁾. 2023년 기

준으로 31개 한국의 기업이 참여했으며, K-RE100이라는 유사한 형태의 캠페인 또한 국내에 정착되어 이미 842개 기업들이 참여한 상태이다²⁾.

문제는 이런 캠페인에 참여한 기업들이 발전사업을 전문으로 하는 기업으로 구성된 것이 아니라, 금융, 건설, 조선 등 전기 발전사업과는 거리가 있는 기업이 다수라는 점이다. 다시 말해, 이런 기업들의 경우에는 REC(Renewable energy certificate, 신·재생에너지 공급인증서)를 직접 구매하거나, 신·재생에너지 생산업자와 개별적으로 계약을 해야 하는 상황이 다가올 것으로 전망된다.

한 연구 결과에 따르면 RE100을 포함한 신·재생에너지 수요가 2030년 기준으로 157.5 ~ 172.3 TWh에 달할 것으로 전망된다고 한다³⁾. 반면에 2023년 국내 신·재생에너지 발전량은 60.4 TWh에 불과하다⁴⁾. 이런 이유에서 신·재생에너지 발전에 대한 수요는 급격히 증가할 것으로 판단되며, 신·재생에너지 관련으로 어떤 형태의 산업이 크게 성장할 것인지 전망하고, 산업안전보건의 시각에서 신산업에 대해 선제적인 산업재해예방 활동이 필요하다고 본다.

우선 국내 신·재생에너지 발전 형태를 살펴보면 <표 I-1>에서와 같이 2023년 기준으로 태양광 41.9%, 바이오 29.5%, 폐기물 8.2%, 연료전지 7.8% 순서로 태양광과 바이오의 비율이 높다. 바이오 중에서는 목재펠릿 41%, Bio-SRF⁵⁾ 20%, 바이오디젤 14%, 바이오중유 7%, 임산연료 4%, 목재칩 4% 등의 순서로 비율이 높다⁶⁾.

1) (사)한국에너지융합협회, “한국의RE100협의체 RE100정보플랫폼”, k-re100.or.kr/doc/sub1_1_1.php (2025.05.19.)

2) (사)한국에너지융합협회, “한국의RE100협의체 RE100정보플랫폼”, k-re100.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub2_2_2 (2025.05.19.)

3) 기업 재생에너지 이니셔티브, 플랜1.5, “2030 국내 재생에너지 수요 전망 보고서”, 2023.

4) 한국에너지공단 통계분석실, “2023년 신재생에너지 보급통계 결과 안내”, 2023.

5) Bio-SRF(Solid refuge fuel) : 식물성 고형연료를 총칭하는 의미로 국내에서는 주로 폐목재, 농업폐기물, 식물성 잔재물을 펠릿 형태로 성형한 제품이 사용되고 있음(산림청 목재산업과, 설명자료(중앙일보 3월10일자 보도에 대한 설명), 2020.

물론 정부 정책이나 시장의 상황에 따라서 크게 변동될 수 있는 부분이지만, 태양광 발전이 날씨의 제약, 지리적인 한계가 있는 점을 고려한다면, 사실상 목재 기반의 바이오매스(Biomass) 발전사업은 계속해서 확대될 것으로 전망된다.

〈표 I-1〉 국내 신·재생에너지 발전 형태와 비율

(단위 : %)

구 분	재생에너지									신에너지	
	태양광	바이오	폐기물	수력	풍력	지열	해양	태양열	수열	연료 전지	IGCC*
발전량 비율	41.9	29.5	8.2	4.6	4.2	1.6	0.5	0.1	0.2	7.8	1.2

* IGCC(Integrated gasification combined cycle) : 석탄 가스화 복합 발전

대한민국의 지리적 특성과 에너지 시장의 특성상 연료용 원자재 조달은 간단한 문제가 아니다. 그런 의미에서 대량 수입이 용이한 목재펠릿은 큰 장점으로 작용할 것으로 예상된다. 더군다나 석탄과 연소 특성이 유사해서 혼합 연소가 가능하기 때문에 큰 이점으로 작용할 것으로 판단된다. 실제로도 [그림 I-1]에서와 같이 RPS제도가 도입된 2012년대비 목재펠릿 생산/수입량은 크게 증가하였다.

【발전용 목재펠릿 사용에 대한 회의적 시각】

목재는 화석연료와 달리 땅속의 탄소를 인위적으로 꺼내서 사용하는 것이 아니므로 대기 중의 탄소 순증가를 의미하지 않기 때문에 재생에너지원으로 국내뿐만 아니라 유럽, 일본 등에서 발전용으로 대량 사용 되어왔다. 사용 초기에는 폐목재 위주로 사용 되어왔으나, 대량 취급에 따라 원목을 분쇄하여 펠릿 형태로 가공 후 사용되고 있는 것이 현실이다. 이에 따라 산림 파괴를 우려하는 목소리가 점점 커지고 있는 것 또한 사실이다. 특히 유럽연합의 경우에는 RED II(Renewable energy directive II) 개정안이 '22년 채택되면서 원목을 직가공한 1차 바이오매스를 재생에너지 항목에서 제외하였다.

6) 한국에너지공단 통계분석실, “2023년 신재생에너지 보급통계 결과 안내”, 2023.

그리고 국내의 경우에도 '22년 국정감사 안건으로 논의되면서부터 목재펠릿에 대한 회의적인 시각이 생겨나고 있는 것 또한 사실이다. 그 결과 '25년부터는 목재펠릿의 REC 가중치를 1.5에서 1.0으로 조정하고, '27년에는 0.5 REC로 조정하는 등, 단계적으로 REC가 하향 조치 될 전망이다. 하지만 이와는 대조적으로 '25년 현재 목재펠릿 전소 발전소 건설이 추진되고 있는 것 또한 사실이라서 선불리 관련 산업을 전망할 수 있는 것은 아니라고 할 수 있다.

2) 목재펠릿 대량 사용으로 인한 위험성

불과 15년 전만 하더라도 국내 산업계에서 목재를 발전 연료와 같이 대량으로 취급한 사례는 없었다. 그 결과 목재분진의 경우 분진폭발, 자연발화 등의 위험이 있는데도 불구하고 크게 사고로 보도되거나, 산업재해 다발 물질로 분류되지는 않았다⁷⁾. 하지만 발전용으로 사용하게 된다는 것은 전혀 다른 의미이다. 우선 대량 취급하게 되면서 불가피하게 컨베이어, 컨테이너 등을 사용할 수밖에 없는 문제가 발생한다. 이런 하역·운반장비를 활용한다는 의미는 분진폭발을 야기하는 분진운 형성 위험이 있다는 의미이다.

더군다나 목재펠릿은 목재, 목재칩(Wood chip), 톱밥 등을 압축(건조)분쇄(성형)을 거쳐 생산한 2차 가공 제품으로, 일반 목재 톱밥보다 함수율이 낮고, 입자 크기 또한 더 작을 수밖에 없기 때문에 분진폭발 위험성에 있어서는 더욱 취약할 것으로 예상된다. 이에 더해 함수율이 관리되지 않는 이동 통로 등에 지속 퇴적되거나, 장기 저장된 목재펠릿의 경우에는 미생물 대사와 화학적 산화로 인해 자연발화·질식·중독 위험 또한 있는 것으로 확인되고 있어 어떤 위험성이 있는지 자세한 검토가 필요한 실정이다⁸⁾.

7) 이근원, 이수희, 한우섭, 한인수, 이정석, 최이락, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 목재분진의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2013.

8) 마사요시 키모토, 마사미 아시자와, “목재펠릿 저장시의 자연발화성에 관한 조사 -자연발화 메커니즘과 실증 시험법-”, 일본 전력중앙연구소 조사보고서 M08022, 2009 (木本 政義, 芦澤 正美, “木質ペレット貯蔵時の自然発火性に関する調査 -自然発火メカニズムと実証試験法-”, 電力中央研究所 調査報告 M08022, 2009).



[그림 I-1] 목재펠릿 국내 생산/수입량

한편 이런 상황과는 달리 아직 국내에서 목재펠릿 관련하여 산업재해통계로 분류되는 중대산업사고나 중대재해는 다행히 보고되지는 않았다. 하지만 최근 언론을 통해서도 목재펠릿 제조소, 발전소에서의 화재·폭발 사고가 보도되기 시작하였으며, 한국보다 신·재생에너지 발전 비율이 높고 목재펠릿 사용량이 많은 일본의 경우에는 2023년도에만 5건의 화재·폭발 사고가 보도되면서 목재펠릿 취급에 따른 위험성을 경고하고 있다.

결과적으로 아직 국내에는 위험성에 대한 인식이 부족한 목재펠릿에 대해 상세히 평가하고, 그 결과를 적재적소에 전파함으로써 사업장에서 위험성을 인지하도록 유도하는 것이 본 보고서의 1차 목적이다. 아울러, 이런 위험성 평가 결과를 토대로 목재펠릿을 취급하는 현장에서 자발적인 안전조치를 하도록 유도하는 것이 2차 목적이라고 할 수 있다.

2. 평가 범위 및 내용

본 보고서의 평가 대상은 전기 발전용으로 제조·사용되는 목재펠릿 취급 과정에서 발생하는 분진으로 한정하며, 발전용 목재펠릿 제조사와 발전소에서 발생하는 분진을 샘플링하여, 화재·폭발 사고와 관련된 물리적 위험성을 확인하고자 하였다. 평가는 크게 입도분석, 분진폭발 특성, 발화 특성으로 분류하여 실시하였다.

입도분석은 목재펠릿 분진의 겉보기 밀도, 입자의 크기 등 가장 기본적인 정보를 제공하기 위한 목적으로 실시하였으며, 분진폭발 특성은 분진폭발 강도와 민감도를 확인하기 위해서 실시하였다. 마지막으로 자연발화와 같은 사고 또한 보고되고 있어 발화 특성에 대해서도 위험성 평가 및 문헌조사를 실시하였다.

3. 위험성 평가 대상 물질

평가 대상 목재펠릿 분진은 (시료A) 발전소 목재펠릿 하역장 바닥, (시료B) 발전소 하역장 지하 컨베이어실 바닥, (시료C) 목재펠릿 제조 현장 집진기 하부, (시료D) 발전소 목재칩 저장소 하부에서 채취하였다. [그림 I-2]는 채취한 시료를 ASTM E11(Test sieve)에 따른 600 μm 체(Sieve)로 체질한 상태이다.



[그림 I-2] 위험성 평가 대상 시료

II. 목재펠릿의 종류 및 제조·발전 공정



II. 목재펠릿의 종류와 제조 및 발전 공정

1. 목재펠릿의 종류

목재펠릿은 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 제20조제2항을 근거로 국립산림과학원고시 '목재제품의 규격과 품질기준 부속서 11'에 따른 품질기준을 충족해야만 판매·유통·수입이 가능하다. '부속서 11'에서는 주거용·소규모 상업용(이하 주거용이라 함)과 산업용으로 구분하여 <표 II-1>과 같이 등급별 관리 기준을 제시하고 있다. 주거용의 경우에는 펠릿 직경이 6 mm, 8 mm로 제한되는 반면, 산업용의 경우에는 6, 8 mm 뿐만 아니라 10 mm, 12 mm까지 허용되는 점이 가장 큰 차이라고 할 수 있다.

등급별로는 주거용의 경우에는 A1, A2, B등급을, 산업용의 경우에는 I1, I2, I3등급을 적용하고 있는데, 각 등급별로 적용 가능한 크기의 차이도 있지만 가장 확연한 차이점은 회분의 양이라고 할 수 있다. 회분은 특정한 조건 하에서 목재펠릿 연소 후에 남는 잔류 무기물의 양을 의미하는데, 아무래도 연소 목적으로 취급되는 제품인 만큼, 회분의 양이 제품의 품질을 가늠하는 기준으로 적용된 것으로 판단된다.

첨가제에 대한 기준도 있으나, 첨가제는 어디까지나 재생에너지로서의 가치를 손상하지 않는 범위에서, 타르와 같은 오염물질 저감이나 연소 효율 향상을 목적으로 첨가하는 경우이며, 주로 전분과 같은 식물성 첨가제가 이용되고 있다¹⁾. 국내 기준 외에는 ISO 17225-2가 CAN/CSA ISO 17225-2, BS EN 17225-2 규격으로 캐나다, 유럽 등지에서 목재펠릿의 품질 등급에 대한 기준을 제시하고 있으나, 사실상 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」 관련

1) 안병준, 이수민, "목타르와 전분 첨가제 혼합에 따른 목재펠릿 품질특성 평가", 한국목재공학회지 vol. 42 no. 3 pp 318-326, 2014.

부속서 11의 내용과 유사한 수준이다.

〈표 II-1〉 국내 목재펠릿 규격·품질관련 주요 기준

구 분	주거용·소규모 상업용			산업용		
	A1	A2	B	I1	I2	I3
직경(mm)	6±1, 8±1			6±1, 8±1	6±1, 8±1, 10±1	6±1, 8±1, 10±1, 12±1
길이(mm)	≥3.15, ≤40			≥3.15, ≤40		
함수율(wt%)	≤10			≤10		
회분(wt%)	≤0.7	≤1.2	≤2.0	≤1.5	≤3.0	≤5.0
순발열량(MJ/kg)	≥16.5			≥16.5		
첨가제(wt%)	≤2			≤2		

품질기준은 목재펠릿의 물성에 대한 기준이고 좀 더 상세한 기준으로는 목재의 종류나, 나무의 부위에 따라 구분하는 경우가 있으나, 산업용 목재펠릿에 있어서는, 이런 수준까지 상세하게 구분하여 유통되고 있지는 않다. 이외 일부 개량형 목재펠릿 종류로, 스팀-폭발(Steam-exploded) 목재펠릿이라고 해서, 고온, 고압의 스팀 처리로 연소 효율을 향상한 목재펠릿 제품도 있으나 아직 국내에서 취급한 사례를 찾아볼 수는 없었다²⁾.

2) Abelha, Pedro, Cieplik, Mariusz K., "Evaluation of steam-exploded wood pellets storage and handling safety in a coal-designed power plant", Energy & Fuels, 35.3 pp 2357-2367, 2021.

2. 목재펠릿 제조 및 발전 공정

1) 목재펠릿 제조 공정

(1) 목재의 전처리

운반상의 편의를 위해 벌목된 목재는 주로 현장에서 ‘껍질제거’, ‘1차 분쇄’ 과정을 거치게 된다. 껍질제거는 디바커(Debarker)라는 장비로, 1차 분쇄는 크리셔(Crusher)라는 장비를 이용하여 목재를 분쇄하게 된다. 껍질까지 펠릿으로 제조하게 되는 경우에는 ‘껍질제거’ 단계 없이, 1차 분쇄를 바로 실시하는 경우도 있으며, 껍질을 포함하게 되는 경우 회분의 양이 많아 품질관리 상에 문제가 발생할 수 있기 때문에, 관련 공정은 선택적으로 결정되게 된다. 이렇게 ‘1차 분쇄’된 목재는 주로 톱밥의 형태나 목재칩의 형태로 목재펠릿 제조공장으로 공급되게 된다.

(2) 목재펠릿 제조 공정

목재펠릿 제조공정은 크게 건조 > 스크리닝(Screening) > 분쇄 > 펠릿 성형 > 냉각 > 포장 6단계에 걸쳐서 펠릿 형태로 제조되게 된다.

- ① 건조 : 주로 컨베이어형 건조로에 원료인 톱밥이나 목재칩을 이송·건조하며 함수율을 조정한다. 규모에 따라서는 로터리 킬른(Rotary kiln)을 사용하기도 한다.
- ② 스크리닝 : 분쇄 직전 단계로 장비 보호 및 품질관리를 위해서 원료에 유입된 자갈 등 이물질을 제거하는 공정으로 필터와 같은 역할을 하게 된다.

- ③ 분쇄 : 톱밥이나 목재칩을 목재펠릿용으로 보다 작게 분쇄하는 공정으로 주로 해머밀(Hammer mill)을 이용한다.
- ④ 펠릿성형 : 펠릿 제조기 종류별로 차이가 있으나 주로 500 ~ 1,500 kg/cm²의 물리적 압력으로 펠릿성형 틀 안으로 원료를 밀어 넣으면서 목재펠릿 형상으로 압축과 동시에 성형하게 된다. 이 과정에서 펠릿은 압축으로 인해서 80 ~ 120 ℃까지 가열되게 된다.
- ⑤ 냉각 : 가열된 펠릿은 자연발화 위험이 있으므로 공기를 이용해 냉각하거나, 제조 공정의 규모에 따라서는 자연 냉각시키기도 한다. 공기를 이용한 냉각방식은 주로 사이클론을 이용하는 것으로 확인되며, 성형기 제조사에 따라서는 사이클론 일체형 장비를 판매하기도 한다.
- ⑥ 포장 : 국내에서 제조되는 목재펠릿은 캠핑, 화목 보일러 용도로 5 ~ 20 kg 정도의 크기로 포장되는 경우가 많으며, 베트남, 인도네시아, 캐나다 등에서 수입되는 펠릿은 20 ft 컨테이너에 바로 포장되어 입고된다. 컨테이너를 기울여 내부의 목재펠릿을 하역하는 방식을 주로 사용하기 때문에, 국내에서 40 ft 컨테이너를 사용하는 경우는 확인 할 수 없었다.

2) 목재펠릿을 이용한 발전 공정

목재펠릿을 이용한 발전 공정은 사실상 석탄 화력발전과 유사하다고 할 수 있다. 그 결과 사이로(Silo), 이송 설비 등의 일부 공정 변경만으로도 무연탄 발전소를 목재펠릿 전소 발전소로 변경할 수 있다. 국내에서도 한국남동발전 산하 영동화력발전본부에서 무연탄 화력발전설비 1, 2호기를 각각 2017년, 2020년에 목재펠릿 전소 발전소로 전환한 사례가 있다.

발전소에 있어서 목재펠릿 취급 공정만 살펴보면 입고 > 사이로 저장 > 미분 > 보일러로 연료 투입 크게 4단계로 구분할 수 있다. 벌크선(Bulk

carrier)으로 입고되는 경우에는 항만에서부터 컨베이어로 이송되어 사이로에 저장되게 되고, 컨테이너로 입고되는 경우에는 전용 하역장에서 지하에 설치된 컨베이어로 이송되어 사이로에 저장하는 것이 보편적인 방법으로 확인된다.

사이로에 저장된 목재펠릿은 컨베이어를 통해 보일러로 이송되어 연소되며, 입고부터 보일러 투입까지의 과정에서 목재펠릿은 여러 단계의 밀폐 덕트 내부의 컨베이어를 거치면서 분진이 퇴적되거나 분진운을 발생하게 되는데, 이런 현상을 최소화하기 위해서 집진 설비가 주요 부위마다 설치된다. 그리고 집진된 분진은 별도 저장 없이 바로 보일러로 재유입되도록 설계하는 경우가 대부분이다.

① 목재의 전처리 공정



② 목재펠릿 제조 공정



③ 목재펠릿 발전 공정



[그림 II-1] 목재펠릿 제조 공정

Ⅲ. 화재·폭발 사고사례

.....

Ⅲ. 화재·폭발 사고사례

1. 국내 사고

산업안전보건법 제2조제1호와 같이 ‘산업재해’란 노무를 제공하는 사람이 작업 또는 그 밖의 업무로 인하여 사망 또는 부상하거나 질병에 걸리는 것을 의미한다. 따라서 화재·폭발 사고가 발생했다고 할지라도 노무를 제공하는 사람, 즉 노동자에게 피해가 없다면 산업재해통계로 분류되지 않는다.

최근 산업재해통계에 따르면 목재펠릿으로 인한 화재·폭발 사고는 <표 Ⅲ-1>과 같이 7건이 전부이다. 추가로 <표 Ⅲ-2>와 같이 2025년 5월 기준, 온라인 언론 검색 결과 2건을 포함하면 총 9건의 사고가 기록상으로는 전부이다.

<표 Ⅲ-1> 최근 10년간 산업재해 중 목재펠릿으로 인한 화재·폭발 사고

연번	발생연월	지역	취급업종	형태	피해	재해개요
1	'24.03	충북	펠릿제조	분진폭발	부상1	정비 작업 중 설비 내부에서의 분진폭발로 인해 분출된 화염에 피해를 입음
2	'23.04	충북	펠릿제조	기타화재	부상1	집진 설비에서 화재 발생으로 소화과정에서 화상을 입음
3	'21.01	충북	펠릿제조	물리폭발	부상1	장비 내부에서 발생한 폭발로 인해 점검구가 열리며 작업자를 가격함
4	'20.11	인천	발전	자연발화	부상1	목재펠릿 저장소에서 화재 발생으로 확인과정에서 화염으로 인해 화상
5	'20.09	충북	펠릿제조	분진폭발	부상3	목재펠릿 성형기 개방작업 중 내부에서 분진폭발이 발생하면서 노동자를 가격함
6	'20.02	충북	펠릿제조	자연발화	부상1	목재펠릿 제조용 톱밥 저장소에서 자연발화로 인한 화재 발생으로 진화과정에서 피해를 입음
7	'18.08	경기	발전	분진폭발	부상1	정비 작업과정에서 분진폭발 발생으로 화염에 직접적인 피해를 입음

* 산업재해통계 재해개요에서 ‘목재’, ‘분진’, ‘우드’, ‘펠릿’으로 검색 후 선별한 결과임

〈표 III-2〉 목재펠릿 화재·폭발 사고 언론검색 결과('25.05월 기준)

연번	발생연월	지역	취급업종	형태	재해개요
1	'22.12	전남	펠릿제조	분진폭발	폭발로 인한 화재로 9,000만원 상당의 물적 피해
2	'19.06	강원	발전	분진폭발	집진 설비에서 폭발로 인한 화재

하지만 세계 각지에서 발생한 바이오매스 화재·폭발 사고 7건에 대해서 F-N 커브형태¹⁾로 정량적으로 사고를 분석한 결과를 보면 결코 안심할 수 있는 수준이 아니다. 사고 분석 결과 7건 중 5건이 ALARP(As low as reasonably possible) 대상인 것으로 산출되었다²⁾.

그뿐만 아니라 관련 문헌조사 결과, 많은 연구자들이 목재펠릿의 위험성에 대해서 경고하고 있는 점 또한 사실이다³⁾⁴⁾⁵⁾. 특히 이런 연구 결과에서 공통적으로 우려하고 있는 점은 목재펠릿의 미래 지향적 성격 때문에, 사용량이 급격히 늘어나면서, 관련 사고 또한 크게 증가할 것으로 예상되고 있다는 점이다.

- 1) 정량적 사고 분석 방법으로 사고사망자(Fatality), 즉 사고의 크기와 사고의 발생빈도를 정량적으로 분석해 사회적으로 허용 가능한 수준인지 여부를 검토하는 방법
- 2) Moreno, V. C., & Cozzani, V. "Major accident hazard in bioenergy production". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 135-144, 2015.
- 3) 양인, 이재정, 안병준, "목재펠릿과 관련한 안전사고의 발생원인 및 예방책-연소 전을 중심으로", *신·재생에너지* 15(3), 77-84, 2019.
- 4) Horváth, J., Balog, K., & Scarafilo, D., "Hazards of Explosibility Dust from Wood Pellets". *Advanced materials research*, 1001, 324-329, 2014.
- 5) Krigstin, S., Wetzel, S., Jayabala, N., Helmeste, C., Madrali, S., Agnew, J., & Volpe, S., "Recent health and safety incident trends related to the storage of woody biomass: A need for improved monitoring strategies". *Forests*, 9(9), 538, 2018.

2. 해외 사고

사고를 이해하기에 앞서 세계 각국의 목재펠릿 생산·사용량이 어떻게 되는지를 이해한다면, 사고 데이터를 더욱 의미있게 분석할 수 있다고 본다. 세계 각국의 목재펠릿 사용량에 대한 공식적인 정보가 취합되어 관리되고 있는 것은 아니어서, 정확한 비교는 어렵겠지만, 2023년 기준으로 세계 각국에서 확인되는 자료를 취합한 결과 <표 Ⅲ-3>과 같이 영국, 일본, 한국 순으로 사용량이 많은 것으로 집계되었다. 이외 프랑스, 덴마크, 스웨덴 등, 유럽 국가들의 사용량은 독일, 이탈리아와 유사한 수준이고, 연도별로 사용량 차이가 크기 때문에 사실 순위에 큰 의미가 있다고 보기는 힘들다. 생산량은 <표 Ⅲ-4>와 같이 미국, 캐나다, 독일 순으로 많은 것으로 확인되었으며, 대체적으로 미국, 캐나다 생산품은 유럽으로, 베트남 생산품은 한국, 일본으로 수출되고 있다.

<표 Ⅲ-3> 2023년 세계 각국의 목재펠릿 사용량

구분	영국	일본	한국	독일	이탈리아
사용량 (만톤)	659	580	425	340	270
출처	BIOMASS MAGAZINE	임야청	산림청	DEPV	QUAL ENERGIA.IT (*24.10.30)

<표 Ⅲ-4> 2023년 세계 각국의 목재펠릿 생산량

구분	미국	캐나다	독일	라트비아	베트남
사용량 (만톤)	954	472	357	215	195
출처	BIOMASS MAGAZINE				VNeconomy

1) 미국에서의 사고사례

미국에는 CSB⁶⁾, 산업안전보건청(OSHA), 환경부(EPA)라는 화재·폭발 사고를 주로 조사하는 기관들이 있지만, 사실상 목재펠릿을 타겟으로 하는 통계자료가 관리되고 있는 것은 아니다. 산업안전보건청에서는 조사 대상 사고에 대한 정보를 제공하고 있지만, 목재펠릿에 해당되는 업종코드 321999(기타 목재제품 제조) 등으로 검색할지라도 일부 제한적인 자료만 확인 가능하다. 그나마 참고할 만한 유의미한 데이터로는 CSB에서 2018년에 발표한 자료로 2006부터 2017년까지 분진으로 인한 화재·폭발 사고를 취합한 데이터가 있으며, 분진안전과학(Dust safety science)이라는 미국의 사설기관에서 매년 발표하는 분진 화재·폭발사고 데이터가 유일하게 확인 가능한 것으로 판단된다.

우선 CSB에서 발표한 자료에 따르면 12년간 분진으로 인한 화재·폭발 사고가 105건 발생한 것으로 집계되었으며, 관련 사망자는 59명, 부상자는 303명인 것으로 발표하였다. 산업 분야별로는 식품(21건), 금속(20건), 목재(20건) 순으로 집계되었다⁷⁾.

또한 분진안전과학(Dust safety science)이라는 미국의 사설기관에서 2022년 발표한 자료에 따르면 <표 III-5>와 같이 미국 내에서 2021년 한 해 동안 총 100건의 가연성 분진으로 인한 화재·폭발 사고가 있었으며, 분야별로는 곡물·농업 분야 46건에 이어서, 목재는 두 번째로 많은 17건의 화재·폭발 사고가 있었던 것으로 집계되었다⁸⁾.

물론 목재펠릿이 직접적인 데이터 분류 조건이 아니어서 참고하기에 모호한 부분은 있지만, 엄밀하게는 톱밥과 같은 목재분진을 2차 분쇄하여 성형한 제품이 목재펠릿인 점을 고려하면 목재펠릿 분진의 위험성을 짐작할 수 있는 사고 데이터라고 할 수 있다.

6) U.S. Chemical safety and hazard investigation board

7) CSB, "Dust incidents 2016-2017", U.S. Chemical safety and hazard investigation board, 2018.

8) Dust safety science, "2021 Combustible incident report", 2022

〈표 Ⅲ-5〉 2021년 미국 내 가연성 분진으로 인한 화재·폭발 사고사례

구분	합계	곡물·농업	목재	식품	발전·석탄	자동차·금속	종이	교육
사고건수	100	46	17	13	9	8	5	2
사망자	2	1	1	0	0	0	0	0
부상자	22	4	5	7	4	1	1	0

추가로 목재펠릿을 타겟으로 하는 사고 데이터를 확인하고자 온라인 검색으로 개별 사고를 건별로 취합하였다. 검색어는 ‘목재펠릿’, ‘바이오매스’, ‘목재칩’ 3가지와 ‘화재·폭발 사고’를 병행 키워드로 사용하였으며, 검색 기간은 최근 5년으로 2020년 ~ 2024년으로 설정하여 실시하였다. 그 결과 〈표 Ⅲ-6〉과 같이 최근 5년간 미국에서 발생한 10건의 사고를 확인할 수 있었다.

〈표 Ⅲ-6〉 최근 5년간 미국에서의 목재펠릿 관련 화재·폭발 사고사례

연번	발생연월	취급업종	형태	피해	재해개요	비고
1	2020.01	펠릿제조	자연발화	-	사이로에서 자연발화로 훈소	DSC
2	2020.06	펠릿제조	분진폭발	부상1	환기 성능 부족으로 폭발한 것으로 추정	iokinetic articles
3	2021.03	펠릿제조	기타화재	-	건조기에서 시작한 화재가 확산	DSC
4	2021.03	펠릿제조	전기화재	-	전기화재로 변압기 원인으로 추측	DSC
5	2022.02	펠릿제조	분진폭발	부상1	집진기 이상으로 확인 중 플래시화재 발생	OSHA
6	2021.09	펠릿제조	분진폭발	부상4	펠릿이 과열되어 발화하면서 분진폭발	DSC
7	2023.02	운반	분진폭발	-	선박에서 하역 중 분진발생으로 폭발	DSC
8	2023.11	운반	자연발화	-	목재펠릿을 실은 바지선에서 화재	USCG
9	2024.07	펠릿제조	분진폭발	-	하역시설 하부 컨베이어에서 폭발로 화재	WSAV.COM
10	2024.11	펠릿제조	분진폭발	-	분진폭발	arkadelphian

2) 일본에서의 사고사례

일본은 한국과 정부 조직, 산업구조 등이 유사한 나라이다. 한국에서 산업 재해통계를 고용노동부에서 관리하고 있듯이, 일본 또한 후생노동성에서 관리하고 있다. 일본 역시 한국, 미국과 같이 목재펠릿을 통계 분류 기준으로 관리하고 있는 것은 아니다. 결과적으로 공식적인 자료가 있는 것은 아니지만, 일본 경제산업성에서 발표한 자료에서, 2019년부터 목재펠릿 발전소에서 발생한 화재·폭발 사고 12건에 대해서 확인할 수 있었다⁹⁾. 사고 건별로 언론 보도 자료와 대조 함으로써 자료의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

〈표 Ⅲ-7〉 최근 6년간 일본에서의 목재펠릿 발전소 관련 화재·폭발 사고사례

연번	발생연월	취급업종	형태	피해	재해개요	비고
1	2020.10	발전	마찰화재	-	목재펠릿이 컨베이어 롤러 마찰에 의해 화재	-
2	2022.02	발전	전기화재	-	컨베이어 전기설비 접속부 단락	-
3	2022.09	발전	자연발화	-	버킷 컨베이어 하부 퇴적분진 자연발화	원인추정
4	2022.09	발전	마찰화재	-	컨베이어 롤러 마찰로 추정	원인추정
5	2023.01	발전	자연발화	-	사이로에 저장된 분진이 자연발화	조사중
6	2023.01	발전	보일러역화	-	보일러 역화에 의해 벙커부분 화재	원인추정
7	2023.01	발전	마찰화재	-	컨베이어 롤러 마찰로 추정	원인추정
8	2023.03	발전	자연발화	-	사이로 내부에서 자연발화	원인추정
9	2023.05	발전	자연발화	-	사이로 내부에서 자연발화	조사중
10	2023.09	발전	분진폭발	-	버킷 컨베이어, 호퍼에서 폭발	조사중
11	2024.01	발전	분진폭발	-	벨트 컨베이어에서 폭발	조사중
12	2024.07	발전	분진폭발	-	버킷 컨베이어에서 폭발	조사중

9) 경제산업성 산업보안그룹 전력안전과, “바이오매스 발전과 관련한 화재·폭발 사고 및 그 대응에 관련하여”, 2024
 (經濟産業省 産業保安グループ 電力安全課, “バイオマス発電所における爆発・火災事故及びその対応について”, 2024).

3) 기타 사고사례

그 외의 사고사례로는 2018년도에 포레스트(Forest)라는 저널에 출판된 연구 결과에서 2000년부터 2018년도까지 세계 각지에서 발생한 사고를 온라인 검색 기반으로 취합한 자료가 있어 소개하고자 한다¹⁰⁾. <표 Ⅲ-8>은 앞서 소개한 연구 결과의 사고사례 27건을 번역한 내용이며, 전체 65건 중에서 목재펠릿과 직접 관련된 산업 분야에서 발생한 사고만 선별한 내용이다.

<표 Ⅲ-8> 2000년 ~ 2018년 세계 각지의 목재펠릿 사고사례(참고자료 인용)

연번	발생연월	국가	취급업종	형태	피해	재해개요	비고
1	2002.05	네덜란드	운반	질식·중독	사망1	항구에서 목재펠릿 하역과정 중 일산화탄소 방출로 작업자 중독	
2	2006.10	미국	발전	-	-	원인불명 화재로 연료용 목재가 한 달간 연소한 사고	
3	2006	스웨덴	운반	질식·중독	사망1	목재펠릿 하역과정에서 선박내 밀폐 공간에 진입하다 중독	
4	2007.05	네덜란드	발전	-	-	목재펠릿 발전소 폭발사고	
5	2007	스웨덴	운반	질식·중독	사망2	목재펠릿 하역과정에서 선박내 밀폐 공간에 진입하다 질식·중독	
6	2007	핀란드	발전	질식·중독	사망1	10톤 규모 사이로에 진입했다 중독으로 사망	-
7	2008	핀란드	발전	질식·중독	사망1	10톤 규모 사이로에 진입했다 중독으로 사망	
8	2009	덴마크	운반	질식·중독	사망2	목재펠릿 하역과정에서 선박내 밀폐 공간에 진입하다 질식·중독	
9	2010.08	미국	펠릿제조	분진폭발	-	펠릿 저장소 호퍼에서 분진폭발 발생으로 화재로 이어짐	
10	2010.01	독일	-	질식·중독	사망1	펠릿 저장용 벙커의 문을 열자마자 질식·중독으로 사망	

10) Krigstin, S., Wetzel, S., Jayabala, N., Helmeste, C., Madrali, S., Agnew, J., & Volpe, S., "Recent health and safety incident trends related to the storage of woody biomass: A need for improved monitoring strategies". Forests, 9(9), 538, 2018.

목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성 평가

연번	발생연월	국가	취급업종	형태	피해	재해개요	비고
11	2010.11	아일랜드	-	질식·중독	사망1	7톤 규모 목재펠릿 저장소로 진입하다가 질식·중독으로 사망	
12	2011.06	미국	펠릿제조	분진폭발	-	분진폭발로 공장 전체가 피해를 입음	
13	2011.11	영국	-	자연발화	-	200톤 규모 펠릿 더미에서 자연발화 발생	
14	2011.02	스위스	-	질식·중독	사망1	임산부가 펠릿 저장소에 진입하다가 질식·중독으로 사망	
15	2012.02	영국	-	자연발화	-	호퍼측에서 시작된 화재가 공장 전체로 확산	
16	2012.05	덴마크	발전	분진폭발	부상3	사이로에서 분진폭발	
17	2012.12	덴마크	발전	자연발화	-	사이로에서 시작된 화재로 확산	
18	2013	미국	펠릿제조	분진폭발	부상1	펠릿제조 설비에서 분진폭발로 화재로 확산됨	
19	2013	독일	펠릿제조	분진폭발	-	사이로 내부에서 분진폭발로 주변의 사이로로 피해	
20	2014.03	미국	펠릿제조	분진폭발	부상2	분진폭발	
21	2014.07	미국	펠릿제조	분진폭발	부상2	분진폭발	
22	2014	인도	발전	-	-	발전소에서 바이오매스 폐기물에서 화재 발생	
23	2015.09	네덜란드	발전	분진폭발	부상6	목재펠릿 저장소 분진폭발 시작으로 화재로 확산	
24	2015.11	영국	운반	자연발화	-	벌크선 카고홀드 내에서 자연발화	
25	2017.04	독일	펠릿제조	자연발화	-	사이로 내부에서 훈소 발생으로 진화에 2주 소요	
26	2017.06	미국	펠릿제조	-	부상2	펠릿제조 공정에서 발생한 화재로 노동자 2명이 연기 흡입	
27	2017.08	캐나다	펠릿제조	자연발화	-	사이로에서 발생한 훈소	

3. 사고사례 분석

1) 사고사례 취합 결과 분석

앞서 국내, 미국, 일본 등 세계 각지에서 발생한 목재펠릿으로 인한 사고사례를 취합하였다. 사실 기간, 업종, 지역 등을 특정한 데이터는 아니라서 통계적 수치로는 큰 의미를 찾기 힘들겠지만, 목재펠릿을 취급하는 과정에 어떤 유형의 사고가 주로 발생하는지 분석하기에는 충분하다고 본다. <표 Ⅲ-1>, <표 Ⅲ-2>, <표 Ⅲ-6>, <표 Ⅲ-7>, <표 Ⅲ-8>에서 총 58건의 사고사례를 취합하였으며 <표 Ⅲ-9>와 같이 사고 발생 형태별로 분석하였다.

<표 Ⅲ-9> 사고 발생 형태별 분석 결과

구분	합계	분진폭발	자연발화	질식 중독	원인불명	마찰화재	전기화재	기타화재	보일러 역화	물리폭발
사고건수	58	22	14	9	4	3	2	2	1	1

또한 사고 발생 장소는 발전소에서 23건, 목재펠릿 제조 현장에서 23건, 선박 운반 과정에서 7건 발생한 것으로 집계되었으며, 사고 내용에서 사고 발생 설비가 확인되는 44건에 대해서 설비별로 분석한 결과, <표 Ⅲ-10>과 같이 사이로 11건, 컨베이어 9건, 저장소¹¹⁾ 7건, 선박 7건 순서로 사고가 많이 발생한 것으로 집계되었다.

11) 사이로를 제외한 지하 저장소, 건물형 저장소, 외부 목재펠릿 더미 등을 의미함

〈표 III-10〉 사고 발생 설비

구분	합계	사이로	컨베이어	저장소	선박	집진기	성형기	전기설비	호퍼	보일러	건조기
사고건수	44	11	9	7	7	3	2	2	1	1	1

2) 화재·폭발 사고의 주요 발생 형태

앞서 분석한 사고사례를 기반으로 주로 발생하는 사고 형태를 〈표 III-11〉과 같이 정리하였다. 분진폭발 사고, 화재 사고뿐만 아니라 사이로와 같은 저장설비의 경우에는 질식·중독사고 위험 또한 높은 것으로 확인되었다.

〈표 III-11〉 목재/목재펠릿으로 인한 화재·폭발 사고의 주요 발생 형태

연번	업종	설비	형태	주요 사고 내용	비고
1	펠릿제조	집진기	분진폭발	· 집진기 운전 중에 분진폭발 · 집진기 정비 목적으로 진입한 상태에서 분진폭발	-
2		성형기	분진폭발 화재	· 성형기 과열로 화재·폭발	
3		건조기	분진폭발 화재	· 건조기 운전 중에 화재·폭발	
4	발전	저장설비	질식·중독 자연발화 분진폭발 가스폭발	· 저장설비 내부로 진입하다가 질식·중독 · 저장설비에서 자연발화로 화재 · 저장설비에서 분진폭발, 가스폭발	사이로 포함
5		컨베이어	분진폭발 마찰화재	· 환기 실패로 분진 폭발 · 컨베이어 덕트에 누적된 분진 자연발화 · 롤러에 물리적 마찰로 인한 화재	-
6	호퍼	분진폭발	· 호퍼에 펠릿투하 과정에서 대전 → 분진폭발		
7	저장설비	질식·중독 자연발화 분진폭발 가스폭발	· 저장설비 내부로 진입하다가 질식·중독 · 저장설비에서 자연발화로 화재 · 저장설비에서 분진폭발, 가스폭발		
8	운반	선박	질식·중독 분진폭발	· 선박내 밀폐공간으로 진입하다가 질식·중독 · 하역과정에서 발생한 분진운이 폭발	

IV. 시험장비 및 방법

.....

IV. 시험장비 및 방법

1. 입도분석 시험

입도분석 시험 방법은 입자를 현미경으로 관찰하면서 측정하는 이미지 분석법 등 <표 IV-1>과 같이 다양한 방식이 있으나, 주로 마이크로미터 단위의 분진 입도 분포를 측정할 때는 레이저 회절 방식이 보편적으로 이용되고 있다.

<표 IV-1> 입도분석 시험 방법의 종류

연번	측정방식	장비	내용	장점	단점
1	광산란법	레이저 회절방식	미산란 이론을 바탕으로 하는 프라운호퍼 회절이론을 이용하는 방식으로 빛이 입자에 대해 회절되는 각도를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 방식	범용성	회절이용 방식으로 구형입자 가정
2		동적 광산란	입자의 크기가 클수록 브라운 모션이 작아지는 특성을 이용한 스톡스-아인슈타인식의 확산계수를 이용하여 입자 크기 산정	작은입자 분석가능	액체분산 시료만 적용
3	침강법	중력방식 원심분리	입자의 크기에 따라서 가리앉거나 원심분리 되는 속도가 다르다는 스톡스의 법칙을 이용하여 빛을 조사하여 관측되는 빛의 세기를 분석	밀도가 다른 혼합물 분석 용이	온도 등 환경변수에 민감
4	이미지 분석법	현미경	현미경이나 고속카메라로 직접 입자를 촬영하여 입자의 크기를 분석하는 방식	크기 및 입자 형상에 대한 정보 제공	관측장비의 성능에 의존도가 높음
5	체분석법	크기별체	가장 고전적인 방식으로 체를 크기별로 쌓아두고 분리되는 입자별로 크기를 측정하는 방식	경제성	상대적으로 큰 입자분석에 적용
6	전기저항법	전기저항 변화측정	전해질 용액에 분산된 입자를 통과시키면서 측정된 전기 저항이 입자의 부피에 비례하는 이론을 응용하는 방식	높은 정밀도	전해질 사용, 오염에 민감

이런 레이저 회절방식의 경우는 건식, 습식 시료 모두에 적용 가능하다. 하지만 프라운호퍼(Fraunhofer)의 회절이론을 기반으로 하기 때문에, 입자의 형태를 구형으로 가정하고 산란 각도를 측정을 통해서 크기를 측정하는 방식이다. 따라서 목재 분진과 같이 긴 형상을 갖는 입자의 경우 측정상의 한계가 있을 수 있으므로 현미경을 활용한 이미지 분석을 병행하여 실시하였다.

1) 레이저 회절 입도분석 장비

〈표 IV-2〉와 같은 베크만쿨터(Beckman coulter)사의 LS 13 320이라는 모델을 이용하여 KS A ISO 13320-1 표준에 따라 건식분산장치를 이용하여 입도분석을 실시하였다. 시험 장비는 [그림 IV-1]과 같으며, 건식 시료를 측정하도록 구성되어 있다.

〈표 IV-2〉 레이저 회절 입도분석 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	LS 13 320	-
2	제조사	베크만쿨터(Beckman coulter)	
3	측정방식	레이저 회절 방식	
4	측정범위	0.4 ~ 2,000 μm	
5	시험표준	KS A ISO 13320-1	



[그림 IV-1] 레이저 회절 입도분석 장비 사진

2) 디지털 현미경

목재계열 분진의 경우 고배율 전자현미경을 이용하여 촬영할 경우 조직 자체가 유사하기 때문에, 시료 간의 차이점을 확연하게 구분하기 어려운 점이 있다. 따라서 <표 IV-3>과 같이 저배율 전자현미경을 이용하여 시료 간의 차이점 및 시료의 형상을 확인하고자 하였다.

<표 IV-3> 디지털 현미경 입도분석 장비 사양

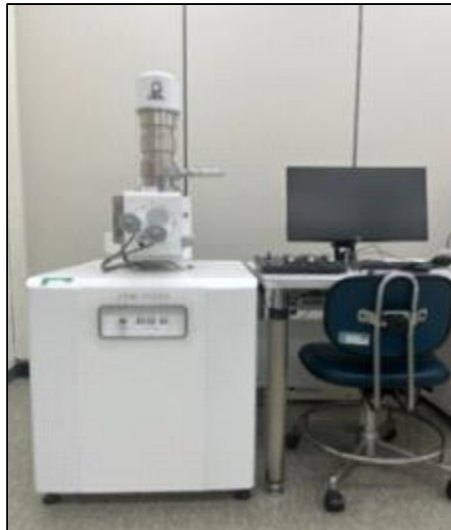
연번	구분	장비	비고
1	모델명	AM 313 Plus	-
2	제조사	디노라이트코리아(Dino-lite Korea)	
3	측정방식	전자현미경	
4	측정범위	x 200	

3) 주사전자현미경

목재펠릿 분진의 형상과 크기를 분석하기 위해 주사전자현미경을 이용하여 목재펠릿 분진을 촬영하였다. 촬영은 도금 작업 없이 1.0 ~ 2.0 kV 범위에서 실시하였으며, 카본 테이프를 이용하여 시료를 부착한 상태에서 실시하였다.

〈표 IV-4〉 주사전자현미경 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	JSM-IT 200	-
2	제조사	지올(JEOL)	
3	측정방식	주사전자현미경	
4	측정범위	x5 ~ x300,000	
5	기타	원소 분석 기능(EDS) 탑재	



[그림 IV-2] 주사전자현미경 사진

2. 분진폭발 특성 시험

화학물질의 물리적 특성이라고 하면 어떤 화학물질이 가지는 고유 특성을 의미한다. 예를 들어, 물의 삼중점이라고 하면 규정된 조건에서의 온도와 같은 값을 특정할 수 있다는 의미이다. 이와는 달리 분진폭발의 특성치는 같은 종류의 분진이라고 할지라도 다르게 나타나는 것이 일반적이다.

이는 무엇보다 분진의 입도 분포가 정확히 일치하기가 어려운 점이 가장 큰 원인이라고 할 수 있겠지만, 실질적으로는 습도 등 환경적 영향뿐만 아니라, 초기 점화에너지 등 연쇄 반응에 영향을 미치는 인자들까지 분진폭발 특성치에 영향을 미치게 되기 때문이다. 따라서 분진폭발의 특성은 절대치로 이해하고 평가하는 것이 아니라, ‘어느 정도 수준이다’와 같은 말로 상대적인 값으로 이해하고 활용되어야만 한다.

이런 분진폭발의 특성치를 규정하고 있는 표준은 크게 미국재료시험협회(ASTM)와 유럽표준(EN) 두 가지로 구분된다. 시험방법, 시험 장비 등에 있어서 두 표준에 큰 차이가 있는 것은 아니지만, 일부 용어상의 정의나, 서로 다른 용어를 사용하는 경우가 있어 구분되어 사용되고 있다.

주로 사용되는 특성치로는 분진폭발의 세기성질을 대표하는 최대폭발압력(P_{max})과 폭연지수(K_{st}) 산정 기준이 되는 폭발압력최대상승속도($(dP/dt)_{max}$)가 많이 활용되고 있으며, 분진폭발에 대한 민감도 기준으로는 폭발하한농도(LEL), 최소점화에너지, 한계산소농도(LOC)가 많이 활용되고 있다.

1) 20리터 구형 시험 장비

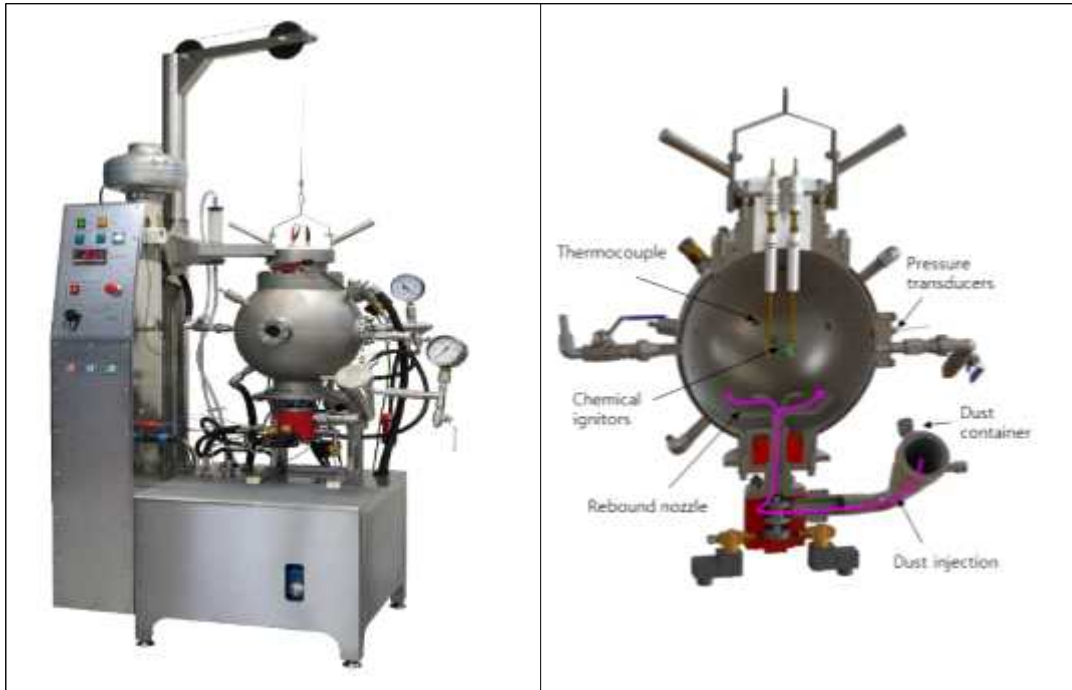
EN 14034시리즈에서는 사실상 1 m³ 부피의 시험 장비를 최대폭발압력, 폭발압력최대상승속도, 폭발하한농도, 한계산소농도 측정 시험 장비로 활용

하도록 표준화하고 있으나, 1 m³ 라는 크기 때문에 시험 장비 크기가 커서 운용상 어려움이 있을 뿐만 아니라, 폭발로 인한 소음, 진동 등의 문제가 있어서, 대체 장비로 <표 IV-5>와 [그림 IV-3]과 같은 20리터 구형 시험 장비가 많이 활용되고 있다.

시험방법은 분진 시료를 주입하고 20 bar 압력의 공기로 분진운을 만든 다음에 화약을 이용하여 폭발시킴으로써 관련 특성을 측정하는 방식이다. 측정한 결과는 1 m³ 부피 시험 장비와 비교할 때, 화염 냉각 속도 등에서 차이가 발생하게 되므로 상대적인 값이라고 할 수 있으며, 표준에서 제시하는 방법에 따라 환산 과정 거쳐 최종 시험 결과로 도출한다.

<표 IV-5> 20리터 구형 시험 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	SPD 2.3	-
2	제조사	양코사(ANKO Trading Ltd., 폴란드)	
3	점화방식	화학점화기를 이용한 점화	
4	측정내용	1) 최대폭발압력 2) 폭발압력최대상승속도 3) 폭발하한농도 4) 한계산소농도	
5	시험표준	1) BS EN 14034-1:2011 (최대폭발압력) 2) BS EN 14034-2:2011 (폭발압력최대상승속도) 3) BS EN 14034-3:2011 (폭발하한농도) 4) BS EN 14034-4:2011 (한계산소농도)	



[그림 IV-3] 20리터 구형 시험 장비 사진 및 설명

2) 분진 최소점화에너지 측정 장비

IEC 60079시리즈 뿐만 아니라 대부분의 표준에서 정의하는 “최소점화에너지는 지정된 시험 조건 하에서 가스, 증기 또는 분진운을 점화시키는데 필요한 전기 스파크 에너지”이다. 따라서 보편적 의미에서의 최소점화에너지, “연소나 발화를 시작하는데 필요한 최소한의 에너지”와는 다르다고 할 수 있다. 예를 들어, 화학 점화기를 이용해서 최소점화에너지를 측정하였다면, 표준에는 부합하지 않는 방식이라고 할 수 있다.

이는 전기적 점화 방식이 그나마 가장 섬세하게 에너지를 제어할 수 있는 수단이기 때문에, 표준에서는 전기적 점화 방식을 표준 시험 방법으로 규정하고 있다. 한편, 캐패시터(Capacitor) 회로를 기반으로 하는 전기적 점화 방식 또한 방전되는 에너지를 실제로 mJ 단위로 섬세하게 제어할 수 있는 것은 아니다. 전기 방전 과정에서는 방전 전극의 곡률(날카로운 정도), 주변의 전자기계, 습도, 캐패시터 오차 등 다양한 인자에 의해 발생하는 문제이다.

이런 이유에서 BS EN 13821:2002에 따르면 분진의 최소점화에너지 측정 결과를 표기할 때는 점화에너지의 범위로 표기하거나, 확률을 기반으로 하는 환산 값을 기준으로 비교하도록 하고 있다.

최소점화에너지 시험 장비는 <표 IV-6>, [그림 IV-4]와 같이 하트만 튜브(Hartmann tube)에 점화기를 연결한 형태이며, Minor 3.0, Mike 3와 같이 다양한 상용 장비가 보급되고 있다. 한편 분진의 최소점화에너지의 경우 이런 상용 장비의 차이에 의해서도 다른 결과가 도출될 수 있는데¹⁾, 분진 최소점화에너지를 이해하는데 있어서는 이런 시험 상의 한계점을 이해하고 접근해야 한다.

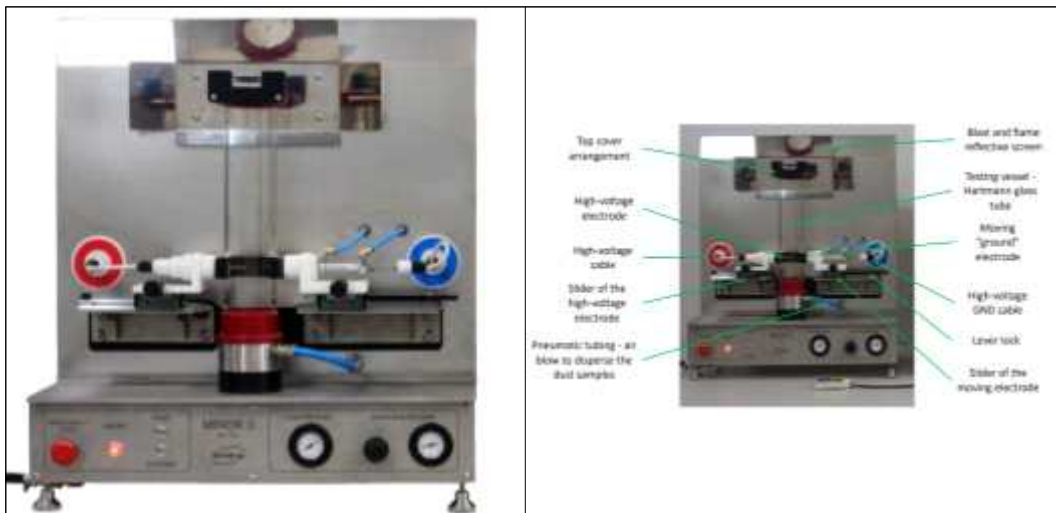
시험방법은 분진 시료를 주입하고 7 bar 내외의 공기 압력으로 분진운을 만든 다음 전기 스파크를 가해서 폭발 여부를 확인하는 방식으로, 설정 농도에서 점화

1) Janes, A., Chaineaux, J., Carson, D., & Le Lore, P. A., “MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: Comparison of measured minimum ignition energy (MIE)”. Journal of hazardous materials, 152(1), 32-39, 2008.

에너지를 1,000 mJ > 300 mJ > 100 mJ 순서로 낮추면서 점화 횟수를 기록하는 방식이다.

〈표 IV-6〉 최소점화에너지 측정 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	Minor 3.0	-
2	제조사	ANKO Trading Ltd., 폴란드	
3	점화방식	전기적 아크	
4	측정범위	1 ~ 1,000 mJ	
5	시험표준	BS EN 13821:2002	



[그림 IV-4] Minor 3.0 시험 장비 사진 및 설명

3. 발화 특성 시험

자연발화(Spontaneous ignition), 자동발화(Auto ignition), 이 두 가지 개념은 국내에서는 ‘자연발화’라는 총칭으로 활용되는 경우가 많아 크게 구분되는 개념은 아니지만, 발화 메커니즘이 달라질 수 있는 문제이고, 이론적 접근 방법이 구분되어 정의될 필요가 있다.

ASTM E659-24나 NFPA 921에 따르면 자동발화는 어떤 물질이 특정 온도에 달했을 때, 외부의 점화원 없이 발화하는 현상을 의미한다고 정의하고 있다. 다시 말해 어떤 물질을 서서히 가열한다고 생각했을 때, 이 물질에서 자연발화성(Pyrophoric)이나 자기발열성(Self heating)이 있고 없고를 고려하지 않는다는 의미이다²⁾³⁾.

한편 자연발화는 자연발화성이나 최소한 자기발열성을 전제조건으로 하는 현상을 의미하므로, 생각하기에 따라서는 자동발화의 개념이 자연발화의 개념보다 넓은 범위라고 판단할 수 있으나, 실제로 자연발화성 물질의 자동발화 온도를 측정할 수 없는 경우도 많기 때문에, 단정적으로 개념상의 집합 관계를 설명하기는 어려울 것으로 판단된다.

1) 자동발화점 측정 시험 장비

앞서 언급한 바와 같이 사실 자연발화점 측정 시험을 엄밀하게 말하자면 자동발화점(Auto ignition temperature) 측정 시험을 의미한다. 다시 말해서 가열 과정에서 산화, 분해 등으로 자연발화하거나 자기발열 현상을 검토하는데 한계가 있다는 의미이다. <표 IV-7>과 [그림 IV-5]에서와 같은 형태

2) ASTM E659-24, “Standard Test Method for Autoignition Temperature of Chemicals”, 2024.

3) NFPA 921, “Guide for Fire and Explosion Investigations”, 2024.

로, 8 cm³ 크기의 시료 큐브에 시료를 담은 상태로 가열로를 0.5 °C/min 속도로 가열하면서 발화 여부를 확인하는 시험 장비로 분진이 부유한 상태인 분진운의 특성을 시험하는 장비와는 다르다고 할 수 있다.

분진운의 최소 점화 온도를 측정하는 장비는 주로 BAM오븐장비(BAM furnace apparatus), G-G오븐장비(Godbert-Greenwald furnace apparatus)가 사용되고 있으며, 이런 시험 장비의 경우에는 분진이 부유된 상태인 분진운의 최소 점화 온도를 측정하는 방식이다 보니 자동발화온도 보다 높게 측정되는 것이 일반적이다.

〈표 IV-7〉 자동발화점 측정 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	ZPA-3	-
2	제조사	페트로테스트(Petrotest)	
3	가열속도	0.5 °C/min	
4	시험표준	NF T 20-036(1985)	



[그림 IV-5] 자동발화점 측정 장비 사진

2) 축열 저장 시험 장비

앞서 언급한 자기발열(Self heating) 현상에 대한 시험방법이다. 어떤 물질이 자기발열 조건에 있다고 할 때는 발열과 더불어 항상 열 손실을 동반하게 된다. 따라서 해당 물질을 기반으로 열적 평형계가 형성되게 되므로, 물질의 종류, 물질의 양, 용기의 종류, 용기의 크기, 대기 조건 등 다양한 변수의 영향에 따라서 물질의 온도가 결정되게 된다.

이는 같은 크기의 자기발열량이 발생하였다고 할지라도 열 손실량에 따라서 다른 온도로 측정될 수 있다는 의미이다. 이런 열적거동을 열역학 기반으로 이론화한 학자가 러시아의 니콜라이 세묘노프(Nikolay Semenov)와 프랑크 카메네츠키(Frank Kamenetskii)이고, <표 IV-8>과 [그림 IV-6]의 축열저장시험 장비 뿐만 아니라, 대부분의 열분석 시험 장비가 두 이론을 기반으로 하고 있다.

시험은 장비의 열 손실량을 측정하는 시험과 자기발열 여부를 확인하는 2가지 형태로 수행되게 된다. 열 손실량 측정은 표준물질을 기준으로 냉각과정에서 발생하는 시간에 따른 온도 감소 속도를 환산하는 방식이고, 자기발열 현상은 온도를 일주일 단위로 5 ℃씩 상승시키면서 시험 챔버의 온도보다 6 ℃이상 변화가 있는지를 관찰하는 방법이 표준에 따른 방식이다.

<표 IV-8> 축열저장시험 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	BAM heat accumulation tester, KRS-RG-6116	-
2	제조사	Kant사(일본)	
3	적용용량	0.5 리터 듀어(Dewar) 병 사용	
4	결과판정	시험챔버 온도와 6도씨 이상 차이 발생시 SADT*발생 판정	
5	시험표준	UN manual of tests and criteria Sec.28 H.4	

* SADT : Self-accelerating decomposition temperature



[그림 IV-6] 축열저장시험 장비 사진

하지만, 표준에 따른 방법은 어디까지나 국제화물운송규격의 적정 여부를 판단하기 위한 방법이고, 본 평가에서는 미생물 대사로 인한 자기발열성이 높을 것으로 예상되는 50 ~ 60 °C 수준에서 온도변화를 관찰하였다.

3) 열중량 분석 장비

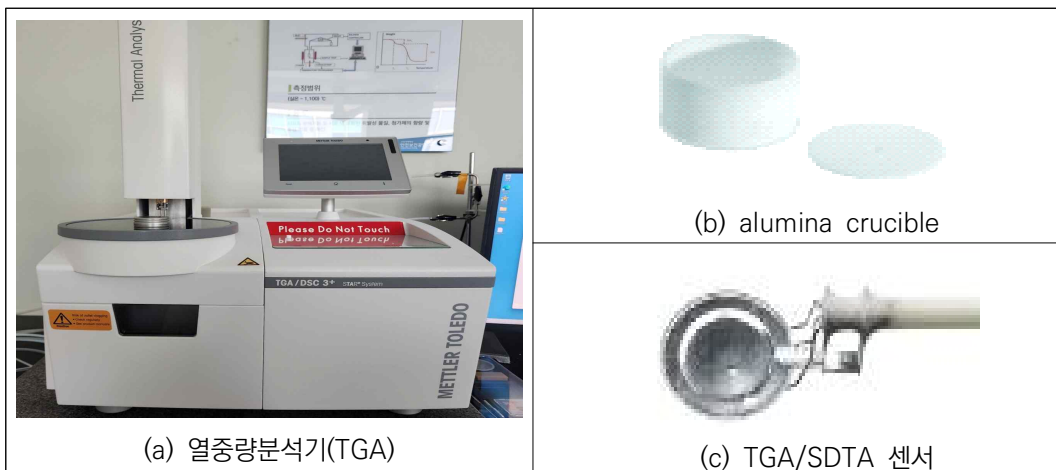
보편적으로 열중량분석기(TGA, Thermo gravimetric analysis)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때, 시료의 질량 변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정하는 분석 장비이다. 이때 시료의 질량 변화는 증발이나 가스를 생성하는 화학반응 등에 의해 발생하게 되며, 장비 내의 저울에 의해 연속적으로 측정된다. 그 결과 보편적으로는 휘발성 물질의 함량, 시료의 열적 안정성, 화학반응의 동역학적 인자, 수분의 함량, 잔류 회분의 함량 등 다양한 방법으로 활용되고 있는 장비이다.

목재펠릿 분진에 대해서는 수분, 회분, 휘발분의 함량과 열분해 시작 온도와 같이 열안정성 데이터를 비교함으로써 분진의 위험성을 검토하고자 하였

다. 시료를 약 4 ~ 5 mg을 분취하여 알루미늄(Aluminum oxide) 재질의 개방팬(Open pan)에 시료를 담아 저울에 올려놓은 후, 질소 및 공기 분위기(유량 50 m/min)에서 10 °C/min의 승온 속도로, 30 ~ 800 °C의 범위에서 측정하였다.

〈표 IV-9〉 열중량 분석 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	TGA/DSC3+	-
2	제조사	메틀러 토레도(Mettler Toledo)	
3	온도 정밀도	±0.2 K	
4	저울측정범위	≤ 1 g	
5	저울측정단위	0.1 µg	
6	샘플부피	900 µl	
7	열량측정단위	0.5 mW	



[그림 IV-7] 열중량 분석 장비 사진

4) 시차주사열량계

시차주사열량계(DSC, Differential scanning calorimetry)는 측정 대상 시료와 기준 물질을 같은 온도 프로그램에 따라 가열 또는 냉각하면서, 발생하는 열흐름의 차이로 열량을 측정하는 시험 장비이다. 크게 전력 보상형(Power compensation type)과 열흐름형(Heat flux type) 두 가지 방식으로 구분된다.

전력 보상형은 측정 대상 시료와 기준 물질의 온도를 항상 같이 유지하기 위해서 가열에 필요한 만큼의 전력의 차이를 측정하여 열흐름을 산정하는 방식이고, 열흐름형은 동일한 열평형계 내에서 측정 대상 시료와 기준 물질 간에 발생하는 온도 차이를 측정하고 이를 기준으로 열량을 환산하는 방법이다.

열흐름형이 설비자체의 구성이 간편하고 넓은 온도 범위에서 사용 가능하기 때문에 주로 사용된다. 반면에 전력 보상형은 팬을 각각 가열하는 방식으로, 각각의 전력을 보상하는 방식이라서 상대적으로 높은 감도를 제공하는 것으로 통상적으로 알려져 있다. 한편 최근에 상업적으로 출시되는 모델의 경우에는 두 가지 모드를 선택적으로 운용할 수 있는 경우도 있다.

시차주사열량계 시험으로는 기본적으로 특정 온도 구간에서의 발열·흡열량을 측정할 수 있으며, 용융열, 경화열, 결정화열, 비열에서부터 순도까지 다양한 열적 특성치를 측정할 수 있다. 특히 고분자 물성 측정에 있어서는 유리전이온도, 산화유도시간 등을 측정할 수 있어 반드시 필요한 장비이다.

본 평가에 사용된 장비는 <표 IV-10>과 [그림 IV-8]과 같다. 시료 용기는 알루미늄 표준 팬을 사용하였으며, 시료를 넣은 후, 피어싱키트(Piercing kit)를 이용하여 직경 50 μm 의 핀홀(Pinhole)로 내·외부압력이 동일한 개방 조건에서 실시하였다. 시료는 1 ~ 2 mg, 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온 속도로 30 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서, 질소와 공기 분위기에서 평가하였다.

〈표 IV-10〉 시차주사열량계 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	DSC5+	-
2	제조사	메틀러 토레도(Mettler Toledo)	
3	온도 정밀도	±0.2 K	
4	온도범위	-50 ~ 700 °C	
5	가열속도	0.01 ~ 200 K/min	



[그림 IV-8] 시차주사열량계 사진

V. 시험 결과



V. 시험 결과

1. 입도분석 시험 결과

1) 입도분석 결과

분진의 입도는 폭발 세기나 점화 민감도 등, 분진폭발의 물리적 특성에 큰 영향을 미치는 주요 인자 중 하나이다. 입도와 연소 사이의 물리 상관관계가 수학적으로 정의된 것은 아니지만, 기본적으로 입도가 작을수록 공기 중에 노출되는 표면적이 증가하면서, 연소속도가 증가한다고 판단하는 것이 보편적인 접근이다. 이런 상관관계는 서서히 가열하거나, 천천히 연소하는 현상에 있어서는 대체적으로 예외 없이 비례관계가 성립한다.

따라서 분진폭발에 있어서도 같은 물질이라면 입도가 작아질수록 폭발 위험성이 크게 측정되는 것이 보편적인 접근이라고 할 수 있다. 하지만 어디까지나 보편적인 접근에서의 의미지, 단정적으로 입도가 작아질수록 분진의 폭발성 또한 커진다고 말할 수는 없다. 특히 목재펠릿 분진과 같이 입도가 작은 분진의 경우에는 입자 간에 응집이 쉽게 발생하게 되므로 예외적인 상황이 발생하기도 하기 때문에 참고할 필요가 있다.

시료A, 시료B, 시료C, 시료D, 4종에 대해서 레이저회절분석방법으로 입도분석을 실시하였으며 측정 결과는 <표 V-1>, [그림 V-2]와 [그림 V-3]에 나타내었다. 중간값은 체적 기준의 도수 분포가 50 %를 나타낼 때의 입자 지름(직경)을 의미하고 d_{50} 으로 표기하였다.

측정 결과 d_{50} 값은 시료A는 $0.620 \mu\text{m}$, 시료B는 $1.389 \mu\text{m}$, 시료C는 $314.1 \mu\text{m}$, 시료D는 $403.0 \mu\text{m}$ 로 산정되었다. [그림 V-2]의 그래프 데이터는 X축이 로그(Log)값으로 표현된 것이다. 이를 선형(Linear) 조건으로 풀

어서 베지에(Bezier) 곡선을 적용하여 시료A와 시료B를 비교해보면 [그림 V-1]과 같다. 입도분석 결과 d_{50} 에 있어서는 시료A와 시료B는 사실 $0.620 \mu\text{m}$ 와 $1.389 \mu\text{m}$ 로 큰 차이가 있는 것 같지만, [그림 V-1]에서 확인 가능하듯이 유사한 분포를 보이는 유사한 시료라고 할 수 있다.

시료A는 목재펠릿 하역장 상부에서 채취한 것이고, 시료B는 목재펠릿 하역장 지하 컨베이어실 바닥에서 채취한 것이어서 유사한 것이 타당하다고 본다. 다만 시료A는 목재의 색상을 가지고 있는 반면, 시료B는 변색되어 회색 빛을 띠는 차이가 확인되었다.

시료B의 변색 원인은 목재펠릿 하역소 지하 컨베이어실 바닥에서 채취한 시료한 시료이다 보니 다양한 요인을 생각해 볼 수 있다. 하지만 보편적으로 목재는 광 노출, 목재 조직의 미생물 대사로 인해서 변색이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이런 현상으로 인해서 조직 자체 또한 연질화 되면서 연소 특성이 달라지기도 하는 것으로 보고되고 있다¹⁾²⁾. 따라서 시료A와 시료B의 입도와 형상은 유사하다고 할지라도 변색이 진행된 시료B의 경우 연소 및 분진폭발 특성에서 있어서는 차이가 발생할 수 있다.

또한 입도분석 결과에서 추가 설명이 필요한 부분은 [그림 V-2]에서와 같이 시료A와 시료B의 입도가 2개의 봉우리를 갖는 피크로 측정되었다는 점이다. 이런 현상은 크게 3가지 원인에 의해서 발생한다고 할 수 있다. 가장 단순한 접근으로는 입도의 양상이 전혀 다른 두 가지 분진이 혼합되어있는 경우라고 할 수 있으며, 두 번째로는 수분이나 어떤 원인으로 응집되면서 두 개의 피크로 측정되었을 수도 있다.

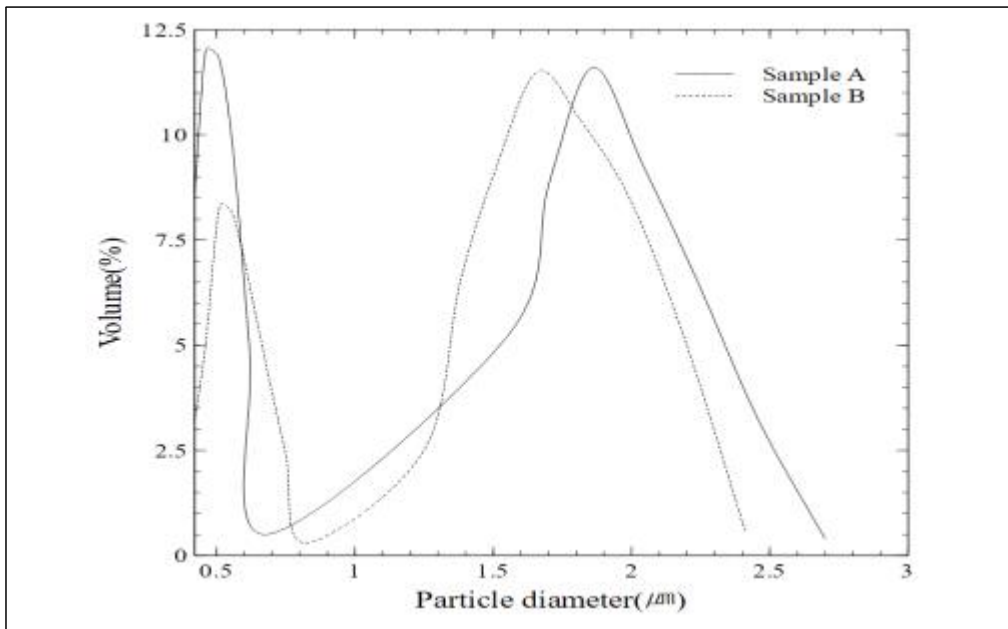
세 번째로 입자의 길이와 폭의 비율(Length to diameter ratio)이 커서

- 1) Graham, S., Eastwick, C., Snape, C., & Quick, W., "Mechanical degradation of biomass wood pellets during long term stockpile storage". Fuel Processing Technology, 160, 143-151, 2017.
- 2) Wzorek, M., Król, A., Junga, R., Małecka, J., Yilmaz, E., & Kolasa-Więcek, A. "Effect of storage conditions on lignocellulose biofuels properties". Scientific Reports, 14(1), 15192, 2024.

발생하는 문제인데, 이 경우에는 [그림 V-2]와 같이 극단적으로 갈라지는 높은 형태의 피크가 아니라, 레이저 회절의 원리상 완만한 분포를 발생시키게 되므로 [그림 V-2]가 세 번째 원인에 해당한다고 판단하기 힘들다고 본다. 이런 이유 때문에 목재펠릿 분진 입도분석에 있어서는 현미경 분석 방법 등을 병행하는 것이 바람직하다.

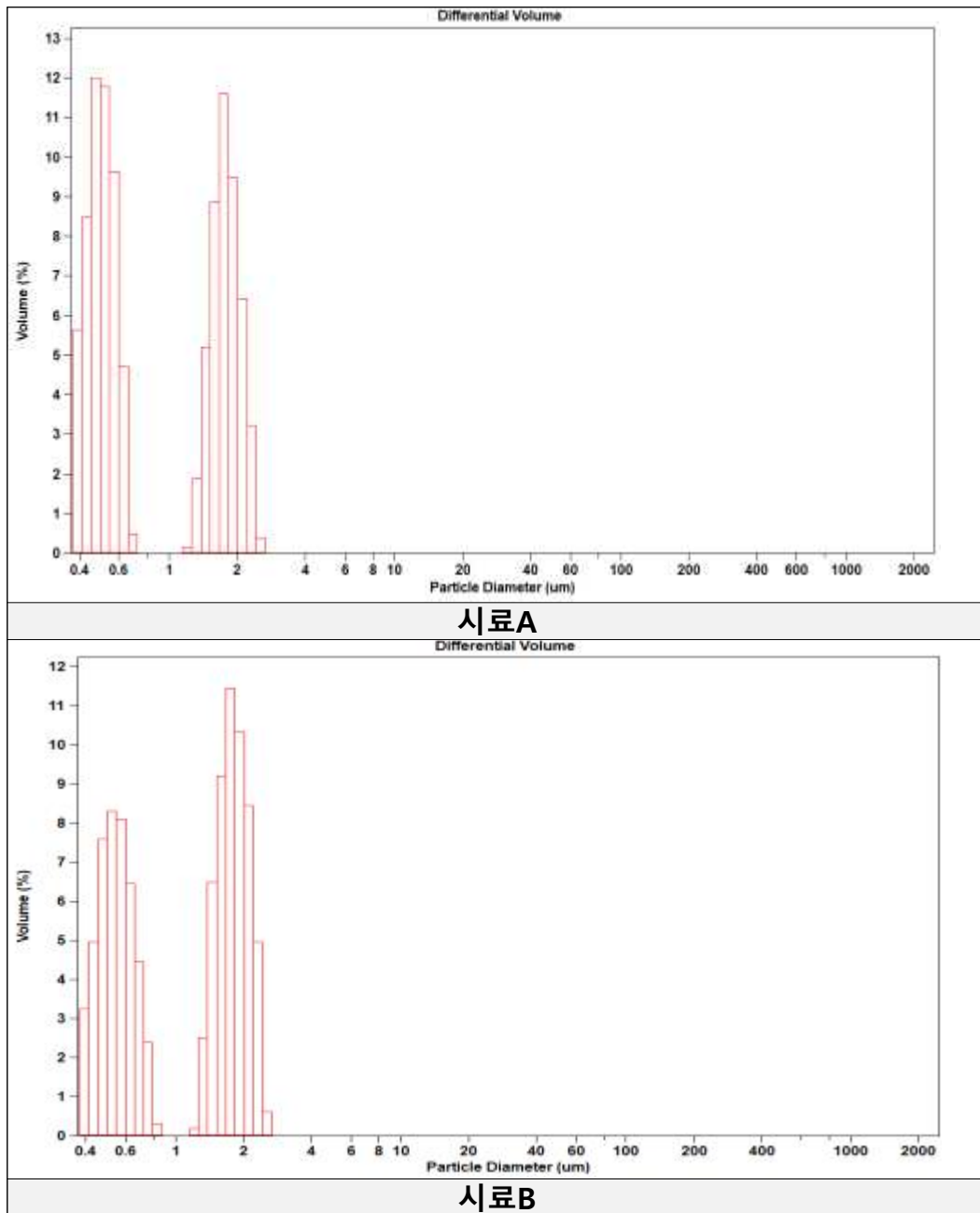
〈표 V-1〉 입도분석 시험 결과

구분	시험 결과(μm)		
	d ₁₀	d ₅₀ (Median value)	d ₉₀
시료A	0.431	0.620	2.018
시료B	0.453	1.389	2.073
시료C	147.8	314.100	545.3
시료D	210.4	403.000	616.8

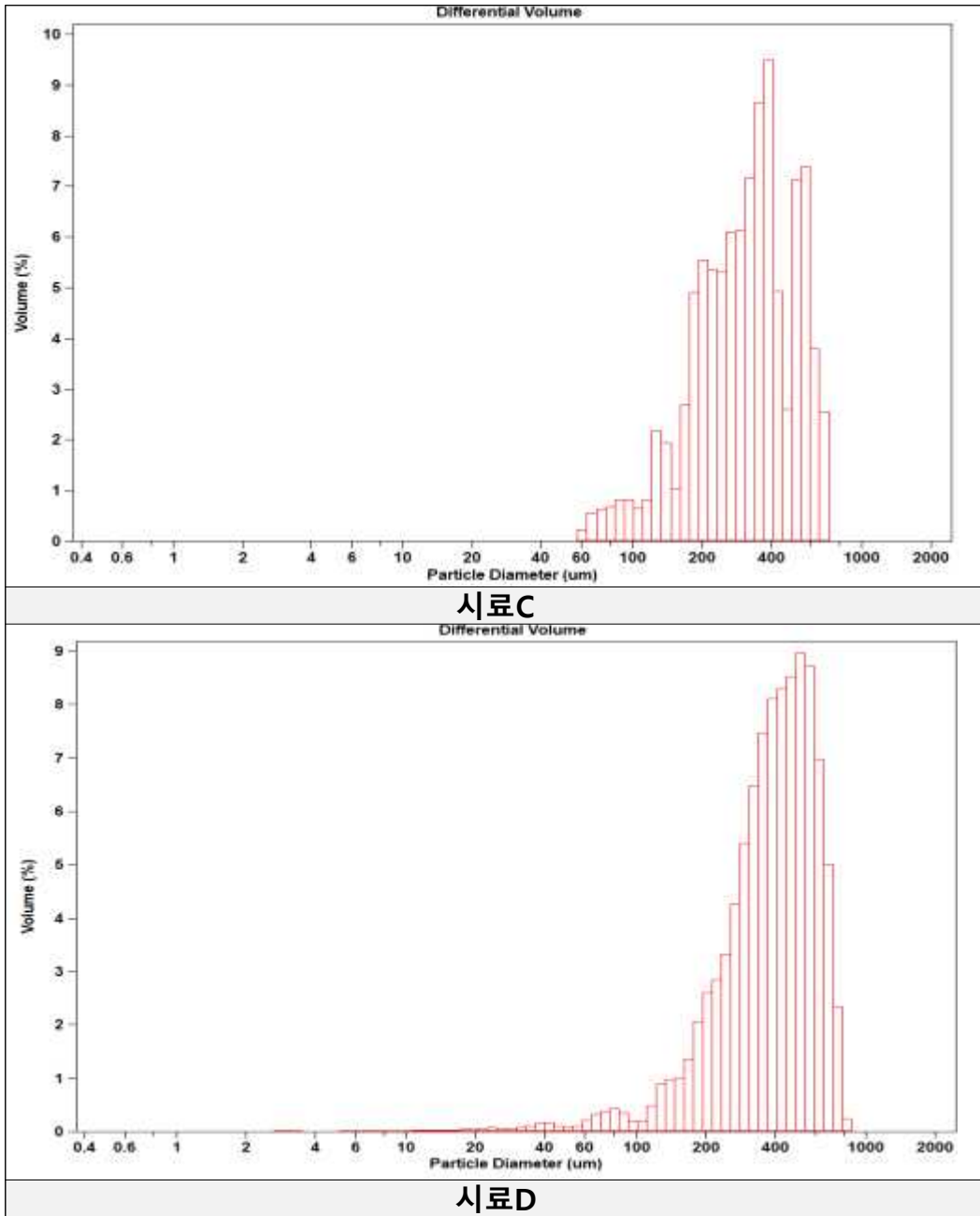


[그림 V-1] 시료A, 시료B에 대한 입도분석 결과 비교

목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성 평가



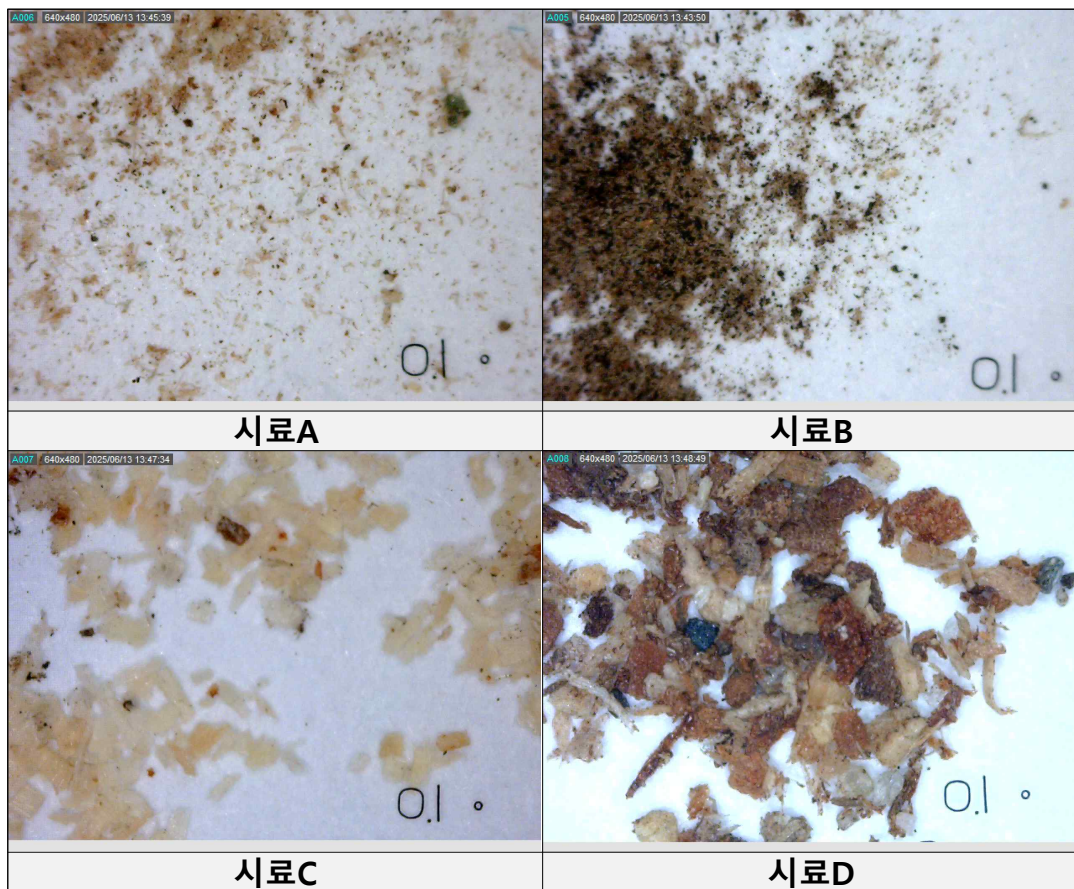
[그림 V-2] 시료A, 시료B에 대한 입도분석 결과



[그림 V-3] 시료C, 시료D에 대한 입도분석 결과

2) 디지털 현미경 분석 결과

시료의 기본적인 구성과 입자 크기를 비교 검토하고자 [그림 V-4]와 같이 디지털 현미경 촬영을 실시하였다. 목재나 목재칩을 2차 가공한 시료A, 시료B의 입자 크기가 시료C, 시료D와 비교했을 때 동일 배율에서 월등히 작은 것으로 확인되었다.



[그림 V-4] 저배율 현미경 촬영 사진

3) 겉보기 밀도 측정 결과

각 시료에 대해서 겉보기 밀도(Bulk density)를 측정하였다. <표 V-2>은 각 시료에 대해서 3회에 걸쳐 측정한 결과 평균값이다.

<표 V-2> 겉보기 밀도 측정 결과

구분	시료A	시료B	시료C	시료D
겉보기 밀도 (g/ml)	0.231	0.275	0.230	0.369

4) 주사전자현미경 분석 결과

[그림 V-5]는 4종 시료에 대한 주사전자현미경 촬영 결과로 스케일바(Scale bar)는 200 μm 와 100 μm 로 표기하였다. 배율은 65 ~ 220으로, 1.0 ~ 2.0 kV 조건에서 도금 처리 없이 촬영하였다. [그림 V-6]에서와 같이 시료D에서는 전형적인 목재 내부 조직인 사각 그물망 형상(Reticular structure)이 확인되는 반면, 시료C에서는 이런 형상이 완전히 압착된 상태이고, 시료A와 시료B에서는 잘게 분쇄된 형태의 입자만 확인되었다.

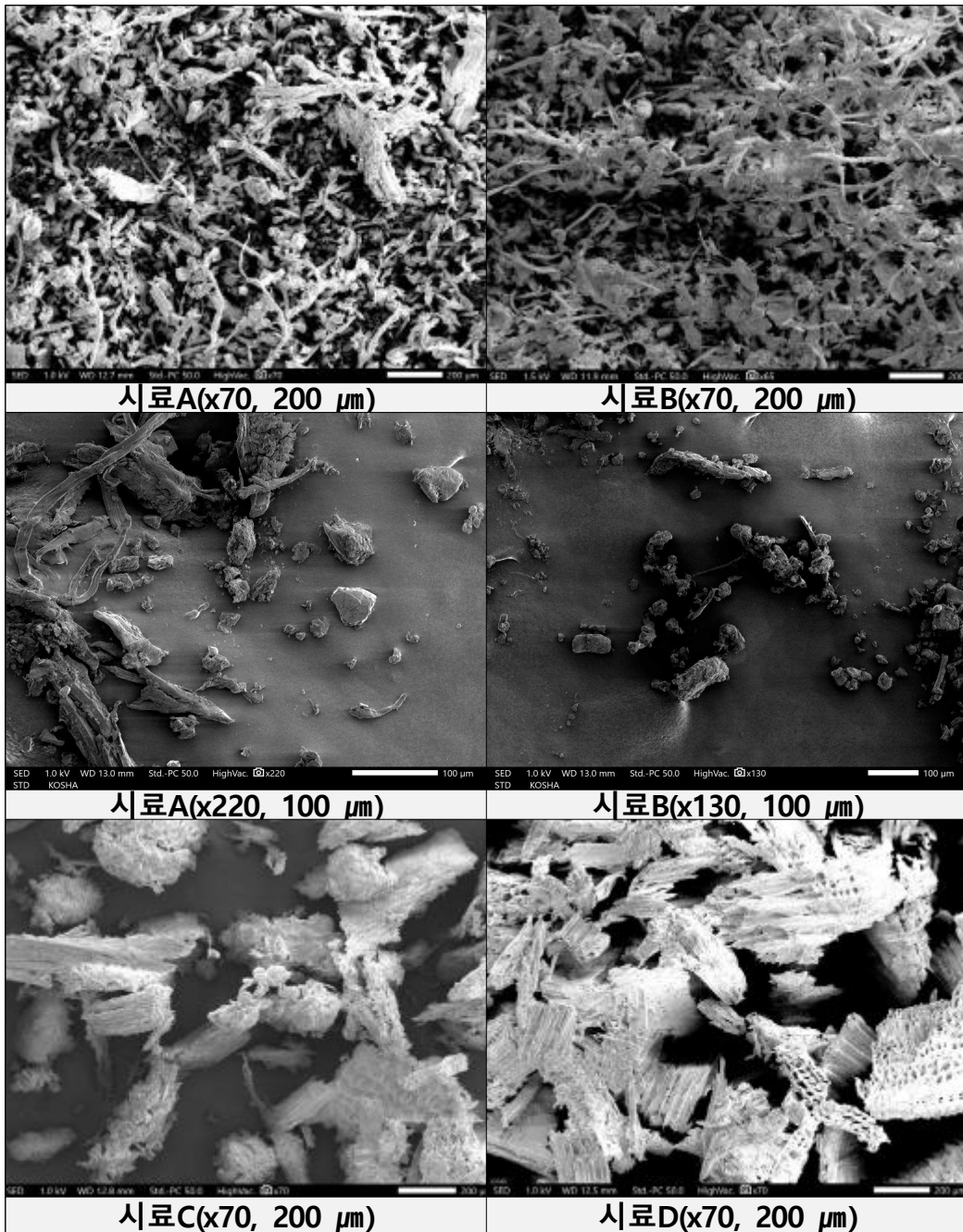
한 연구 결과에서는 목재의 세부 조직을 [그림 V-7]과 같이 마이크로구조(Microstructure) > 셀룰로스섬유(Cellulose fiber) > 마이크로피브릴번들(Microfibril bundle) > 마이크로피브릴(Microfibril) > 엘레멘트리피브릴(Elementary fibril) 단계로 구성된다고 소개하였다³⁾. 이 연구의 분류 기준에 따르면 시료D는 마이크로구조가 확인 가능한 상태이고, 시료C는 마이크로 구조가 압착된 상태이며, 시료A와 시료B는 대부분 마이크로구조가 완

3) Chen, C., & Hu, L.. "Nanoscale ion regulation in wood-based structures and their device applications". *Advanced Materials*, 33(28), 2002890, 2021.

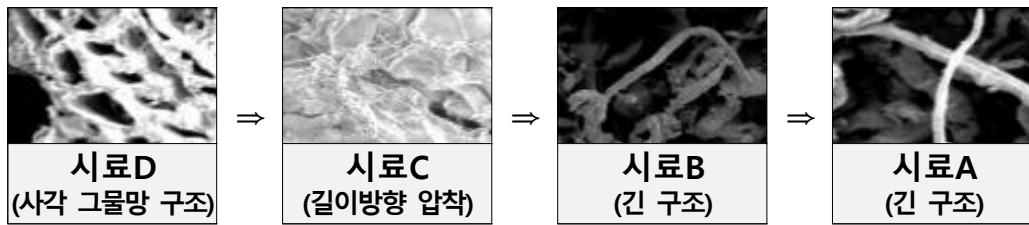
전히 붕괴된 상태로 셀룰로스섬유나 그 이하로만 구성된 상태라고 할 수 있다.

앞서 '1) 입도분석 결과'에서 시료A, 시료B 결과가 날카로운 2개의 피크로 측정된 원인으로 입자 간의 응집을 예상했듯이, 실제로 [그림 V-8]에서와 같이 단일 입자와 응집 입자를 식별할 수 있었다. 이미지제이(Imagej)를 이용하여 입도 분포를 측정하였으나, 응집 입자가 많고, 마이크로피브릴본들인 입자 또한 다수 포함되어 있어 의미 있는 결과를 확인할 수는 없었다.

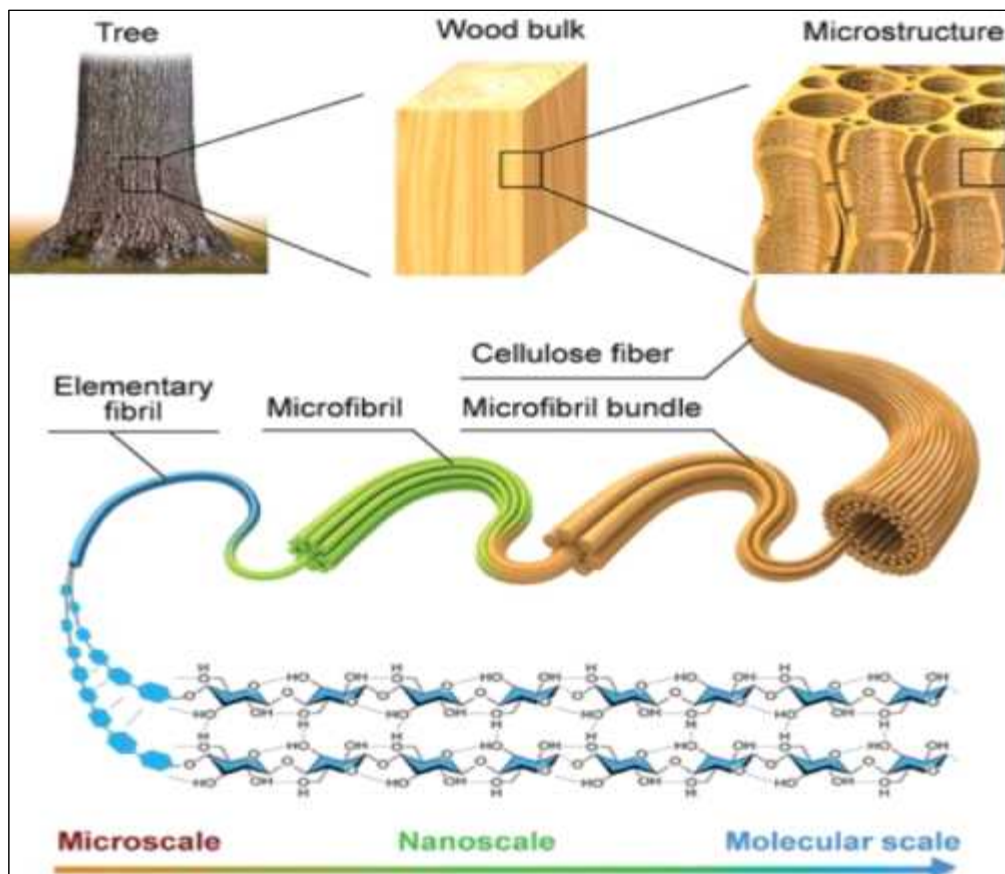
아울러, 세포호흡으로 인한 영향을 확인하고자 각 시료에서의 균이나 세균을 관찰하기 위해 10 μm 이하까지 접근하였으나, 균·세균의 크기와 시료의 입자 크기·형상이 유사하기 때문에 식별할 수는 없는 상태였다. 이런 경우 별도 배양 과정이 필요한 것으로 판단되었다.



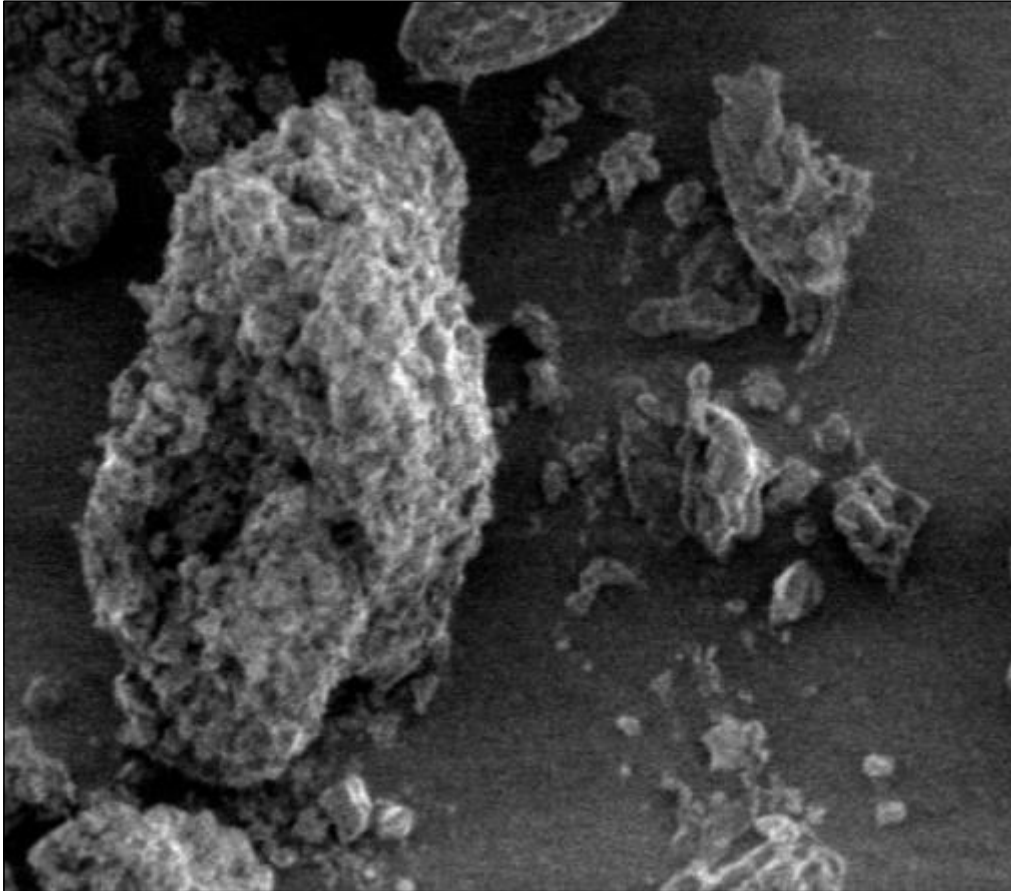
[그림 V-5] 시료A, 시료B, 시료C, 시료D의 주사전자현미경 촬영 결과



[그림 V-6] 시료A, 시료B, 시료C, 시료D의 주사전자현미경 촬영 결과 주요 부위



[그림 V-7] 일반적인 목재 조직의 구성



[그림 V-8] 시료A의 주사전자현미경 촬영 사진 확대 결과

2. 분진폭발 특성 시험 결과

1) 20리터 구형 시험 장비 측정 결과

20리터 구형 시험 장비로 시료A, 시료B, 시료C에 대해서 분진폭발 압력 측정 시험을 실시하였다. 분진폭발 압력 측정 과정에서 ‘폭발압력상승속도’를 측정할 수 있으므로, 해당 데이터로부터 폭연지수(Kst)와 분진폭발등급을 산출하였다. 20리터 구형 시험 장비에 대한 추가 시험으로 분진 폭발하한농도 또한 측정하였다.

(1) 분진폭발 압력 측정 결과

BS EN 14034-1, ASTM E1226에서는 1 m³ 구형 시험 장비를 표준으로 사용하도록 하고 있다. 20리터의 구형 시험 장비의 경우 화염이 냉각되는 속도가 표준 시험 장비 대비 상대적으로 빠르고, 화학점화로 인한 영향이 크기 때문에 다른 결과가 측정된다. 따라서 그간의 많은 시험 결과를 바탕으로, 20리터 구형 시험 장비로 시험한 결과를 표준 시험 장비에 대한 결과로 환산하는 방법이, 앞서 언급한 두 가지 표준에서 제시되어 있어 보편적으로 활용되고 있다. 환산 방법은 두 표준 모두 동일하며, 다음과 같이 최대폭발압력이 5.5 bar 이상과 미만인 경우로 구분하여 적용한다.

P_{ex} 가 5.5 bar 이상인 경우

$$P_{max} = 0.775P_{ex}^{1.15}$$

P_{ex} 3회 시험결과 최대폭발압력 평균 값, bar

P_{max} 1 m³ 구형시험 장비 결과로 환산된 최대폭발압력, bar

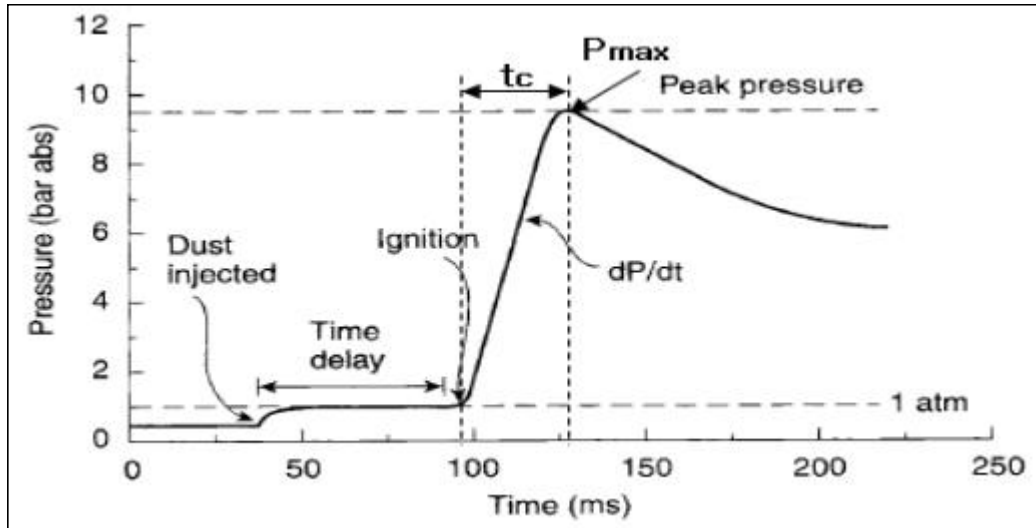
P_{ex} 가 5.5 bar 미만인 경우

$$P_{max} = \frac{5.5(P_{ex} - P_{ci})}{(5.5 - P_{ci})} \text{ (bar)}$$

$$P_{ci} = \frac{1.6 \cdot E_i}{10,000}$$

P_{ci} 화학점화기의 폭발압력, bar

E_i 화학점화 에너지, J



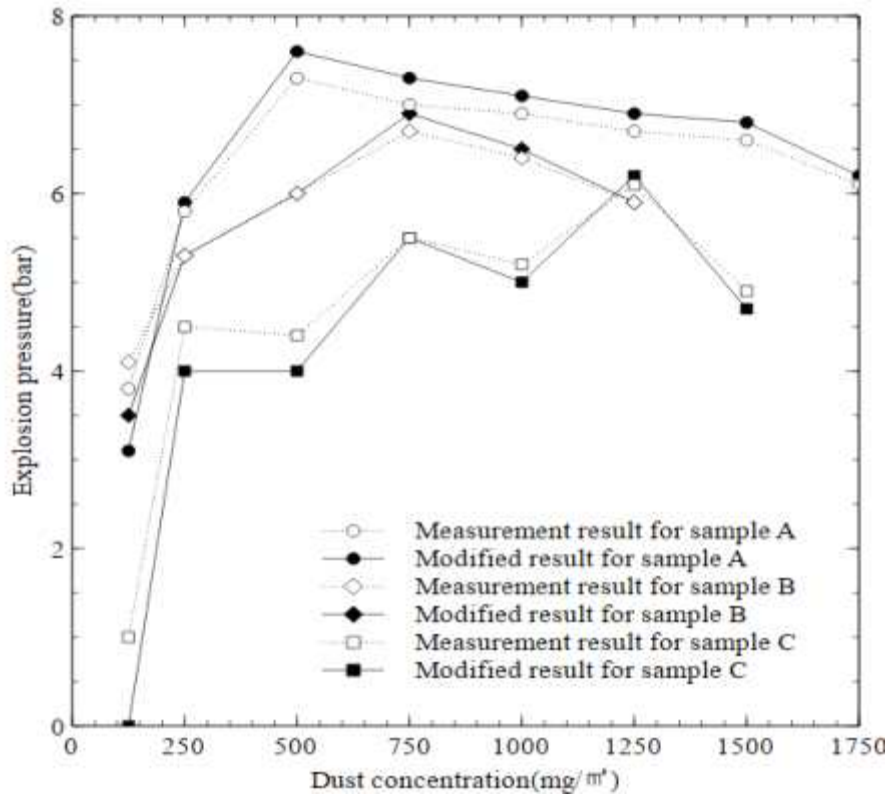
[그림 V-9] 시험 결과 설명(시간에 따른 압력변화)

<표 V-3>과 [그림 V-10]은 10 kJ 화학점화기로 측정한 분진폭발 압력과 환산한 분진폭발 압력이다. 환산한 최대 분진폭발 압력으로는 시료A가 7.6 bar(농도 500 g/m³), 시료B는 6.9 bar(농도 750 g/m³), 시료C는 6.2 bar(농도 1,250 g/m³)로 나타났다. 다시 말해, 폭발 강도에 있어서는 시료 A, 시료B, 시료C순으로 세계 나타났다고 할 수 있다.

〈표 V-3〉 분진 폭발압력 측정 결과

농도 (g/m ³)	폭발압력(bar)			환산폭발압력(bar)			비고
	시료A	시료B	시료C	시료A	시료B	시료C	
125	3.8	4.1	1.0	3.1	3.5	0.0	-
250	5.8	5.3	4.5	5.9	5.3	4.0	-
500	7.3*	6.0	4.4	7.6*	6.0	4.0	-
750	7.0	6.7*	5.5	7.3	6.9*	5.5	-
1,000	6.9	6.4	5.2	7.1	6.5	5.0	-
1,250	6.7	5.9	6.1*	6.9	5.9	6.2*	-
1,500	6.6	-	4.9	6.8	-	4.7	-
1,750	6.1	-	-	6.2	-	-	-

* 최대 분진폭발 압력



[그림 V-10] 분진폭발 압력 측정 결과 비교

분진의 폭발등급(St 1~St 3)은 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\max}]$ 데이터를 폭연지수(K_{St})로 환산하여 결정하고 있다. 이런 폭연 지수는 폭연 방출구의 크기를 산정하는데 직접 활용되기도 하지만, <표 V-4>와 같이 분진폭발 등급을 결정하는 기준으로 활용된다.

〈표 V-4〉 BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급

폭발 등급	K_{St} (bar·m/s)	폭발의 특징	예
St 1	> 0 to 200	폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진 (Weak/Moderate explosion)	곡물 분진
St 2	> 200 to 300	폭발에 의한 위험성이 큰 분진 (Strong explosion)	유기안료/에폭시수지
St 3	> 300	폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진 (Very strong explosion)	미세한 금속 분진

폭연지수는 BS EN 14034-2, ASTM E1226 두 표준 모두 다음과 같이 입방법칙(Cubic law)에 따라서 산정하도록 규정하고 있다.

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}}$$

$$K_{St} \quad \text{폭연지수, bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \quad \text{3회 시험결과 폭발압력상승속도 평균 값, bar} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$V \quad \text{구형시험장치의 부피, m}^3$$

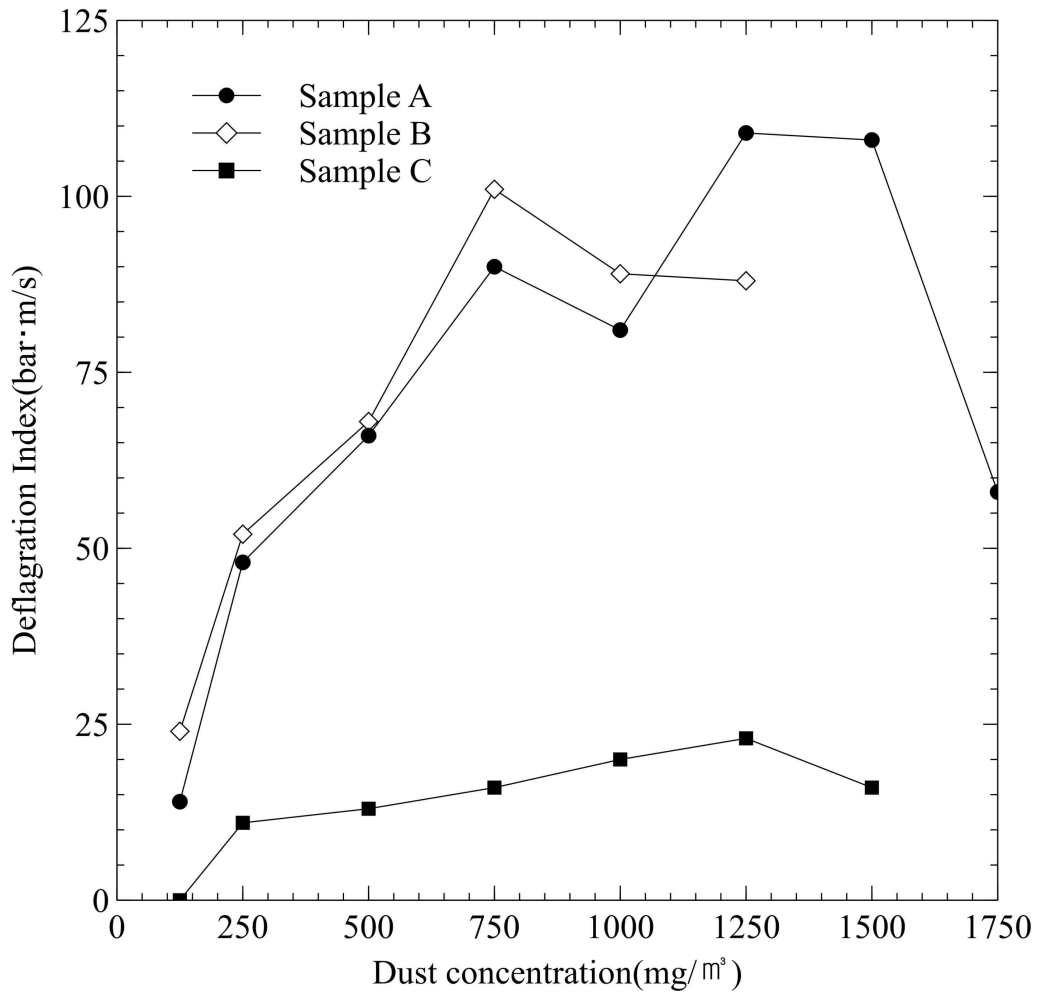
<표 V-5>는 분진폭발 시험 결과로 ‘폭발압력상승속도’, ‘폭연지수’, ‘연소지속시간’에 대한 측정 결과이다. 폭연지수에 있어서는 시료A가 109 ba

r·m/s(농도 1,250 g/m³), 시료B는 101 bar·m/s(농도 750 g/m³), 시료C는 23 bar·m/s(농도 1,250 g/m³)로 산출되었다. <표 V-4>의 기준으로는 시료A, 시료B, 시료C 모두 “St 1” 분진폭발 등급에 해당하는 결과이다. 참고로 [그림 V-9]에서 t_c에 해당되는 연소지속시간의 경우 38.0 ~ 315.6 ms 범위에서 측정되었다.

<표 V-5> 분진 폭발압력상승속도 속도 측정 결과

농도 (g/m ³)	폭발압력상승속도, dP/dt (bar/s)			폭연지수 K _{st} (bar·m/s)			연소지속시간 (ms)		
	시료A	시료B	시료C	시료A	시료B	시료C	시료A	시료B	시료C
125	50	89	0	14	24	0	180.5	87.5	80.9
250	176	192	42	48	52	11	76.4	94.4	260.3
500	243	251	48	66	68	13	61.3	59.1	315.6
750	331	373*	60	90	101*	16	48.0	39.7	175.4
1,000	300	330	74	81	89	20	48.5	43.3	195.2
1,250	400*	323	86*	109*	88	23*	41.4	44.5	121.6
1,500	396	-	60	108	-	16	38.0	-	220.5
1,750	212	-	-	58	-	-	56.2	-	-

* 각 시료별 최대값



[그림 V-11] 시료별 폭연지수 비교

(2) 분진 폭발하한농도

20리터 구형 시험 장비에 대한 추가 시험으로 BS EN 14034-3에 따라 3종 시료에 대해서 분진 폭발하한농도를 측정하였다. 해당 표준은 BS EN 14034-1, BS EN 14034-2와 동일하게 점화지연시간은 60 ms기준을 적용하도록 하고 있으나, 화학점화기는 2 kJ을 적용하도록 규정하고 있다. 2 kJ이라는 폭발압력은 BS EN 14034의 환산 기준에 따르면 0.32 bar에 해당하는 압력이다.

따라서 표준에서는 1 m³ 구형 시험 장비를 기준으로 측정된 폭발 과압이 0.3 bar 이상인 경우에 분진폭발이 발생한 것으로 판단하도록 규정하고 있다. 한편 20리터 구형 시험 장비를 사용하는 경우에는 상대적으로 냉각이 빠르고 화학점화기로 인한 영향이 큰 특성을 고려해서 0.5 bar 이상인 경우를 폭발로 판단하도록 하고 있다.

측정 결과는 <표 V-6>에 각 시료별로 정리하였다. 시료A와 시료B는 동일하게 70 g/m³가 폭발하한농도로 판정되었고, 상대적으로 입도가 큰 시료C의 경우에는 200 g/m³가 폭발하한농도로 판정되었다.

<표 V-6> 분진 폭발하한농도 측정 결과

농도 (g/m ³)	측정 입력(bar)			비고
	시료A	시료B	시료C	
60	0.4	0.4	-	-
70	0.4	0.3	-	-
80	0.5*	0.5*	-	-
90	1.0*	0.6*	-	-
		⋮		
160	-	-	0.3	-
180	-	-	0.3	-
200	-	-	0.4	-
250	-	-	3.3*	-

* 폭발 판정

(3) 분진폭발 최소점화에너지

앞서 시험 장비 소개에서 언급한 바와 같이 분진폭발 최소점화에너지 시험 결과를 절대적인 값으로 이해하고 활용하는 것은 굉장히 위험한 일이라고 할 수 있다. 특히 관련 표준에서 제시하는 단일치(Single value)는 분진간에 비교를 목적으로 점화 확률을 고려하여 환산한 수치일 뿐이지 절대적인 값으로 이해해서는 안된다. 분진폭발 최소점화에너지라고 하면 어디까지나 분진폭발의 민감도를 정량적으로 확인하기 위한 방법이지, 분진폭발이 발생하기 위해 필요한 최소한의 에너지가 아니라는 점을 이해해야 한다.

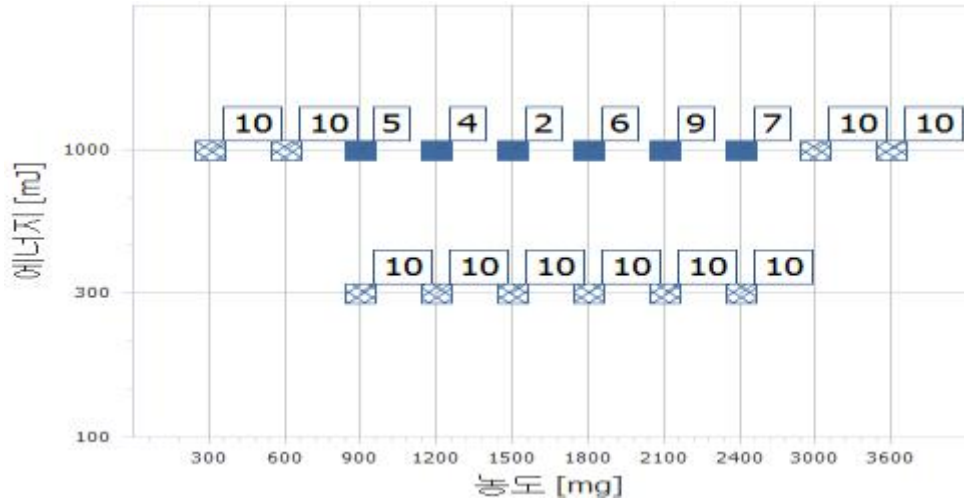
분진폭발 특성 시험에 있어서 대부분의 표준에서 1 m³ 구형 시험장치를 기본 모델로 설정한 이유는 결국 분진운이 형성되었을 때의 균질성 때문이라고 할 수 있다. 하트만 튜브 형식의 시험 장비의 경우 형상 때문에 이런 균질성 문제가 항상 제기된다. 따라서 표준에서 제시하는 방법 외로 점화 위치를 달리하여 결과를 비교하는 방식이 적용되는 경우도 다수 있다. 한편 표준에서는 이런 불균질성 문제를 해소하기 위해서 점화 지연 시간을 조정하는 방법을 주로 사용한다. 이번 시험에 있어서는 점화지연시간을 60 ms, 90 ms, 120 ms 세 단계로 조정하면서 실시하였다.

시험 결과는 [그림 V-12]에서 [그림 V-15]까지 나타내었다. E1은 10회 점화 결과 점화하지 않은 최소에너지이고, E2는 10회 점화시험 결과 1회 이상 점화한 최소에너지이다. 따라서 최소점화에너지는 E1(mJ) ~ E2(mJ) 범위로 표기한다.

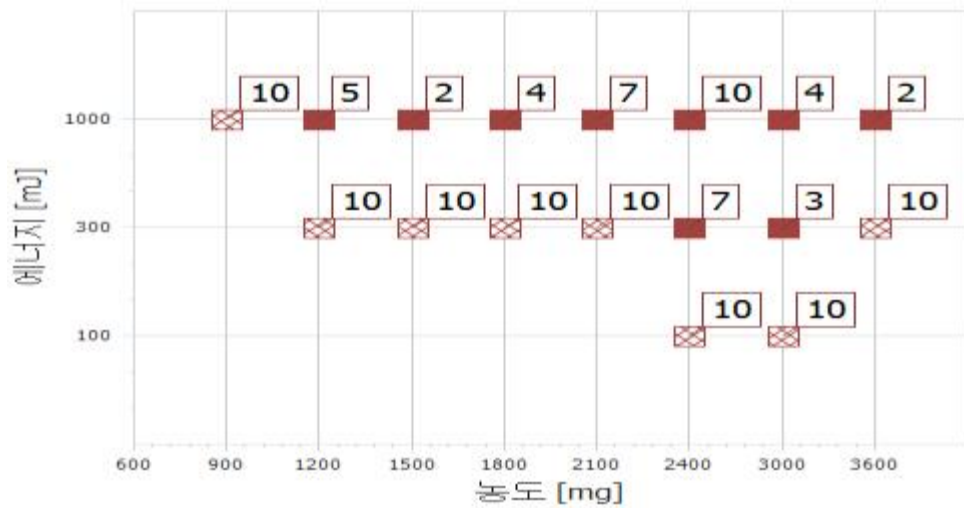
그래프에서 ■ 마커는 점화한 경우이고, 마커 바로 위의 숫자는 10회 점화 결과 중 폭발한 점화 시험 번호이다. ▣ 마커는 10회 점화에서 폭발이 확인되지 않았다는 의미이다. 이런 폭발 횟수까지 고려하여 환산한 결과가 단일치(Es)이다.

최종적으로 시료A는 최소점화에너지가 100 mJ ~ 300 mJ로 판정되었으며, 이때의 단일치는 228 mJ로 환산되었고, 시료B는 300 mJ ~ 1,000

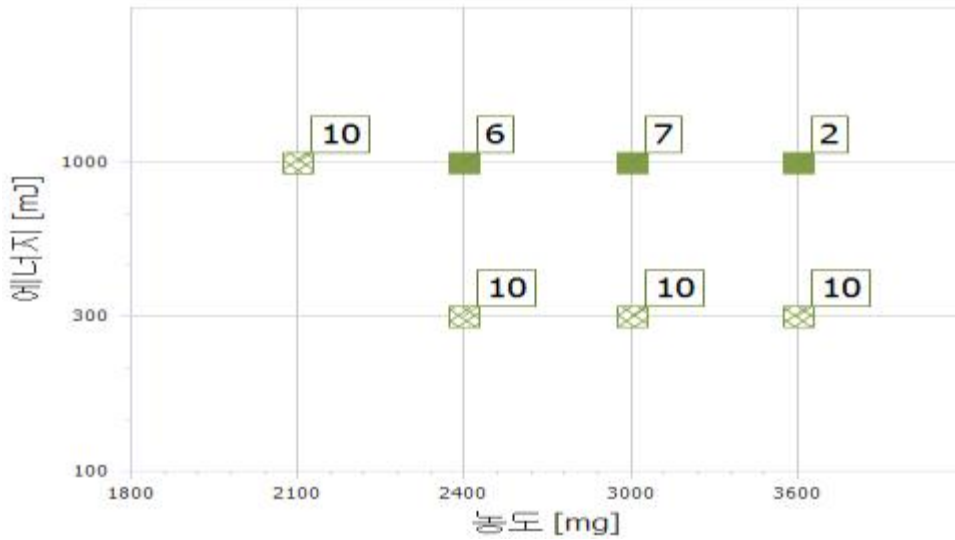
mJ로 판정되었으며, 단일치는 887 mJ로 환산되었고, 시료C는 폭발이 확인되지 않아 최소점화에너지가 1,000 mJ 초과하는 것으로 판정되었다.



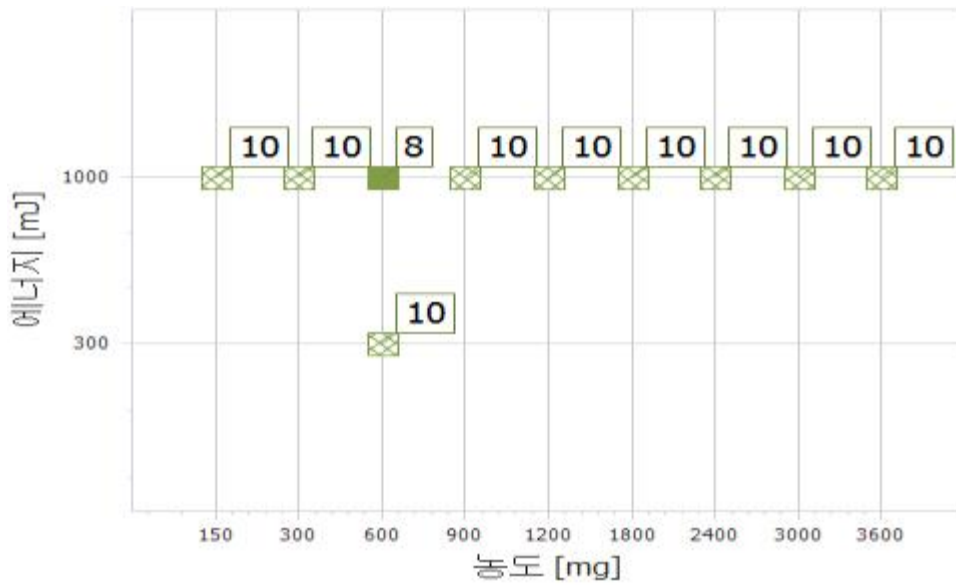
[그림 V-12] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 60 ms)



[그림 V-13] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 90 ms)



[그림 V-14] 시료A의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 120 ms)



[그림 V-15] 시료B의 최소점화에너지 측정 결과(지연시간 90 ms)

[참조] 시료B(지연시간 60 ms, 90 ms), 시료C(지연시간 60 ms, 90 ms, 120 ms)에서는 점화가 확인 되지 않음

3. 발화 특성 시험 결과

1) 자동발화점 측정 시험 결과

시료A, 시료B, 시료C에 대해서 자동발화점 측정시험을 실시한 결과를 <표 V-7>에 정리하였다. 승온 속도는 0.5 °C/min로 각 시료별로 3회에 걸쳐 측정한 결과, 시료A는 최소 234 °C(평균 236 °C), 시료B는 최소 226 °C(평균 231 °C), 시료C는 최소 271 °C(평균 276 °C)에서 자동발화하는 것으로 확인되었다. 이론적으로도 같은 화학적 특성을 가지는 물질이라면 입자가 작은 시료A와 시료B의 자동발화 온도가 시료C 보다 더 낮게 측정되는 것이 물리적으로 타당하다.

<표 V-7> 자동발화점 측정 결과

연번	대상	시료량(g)	감소량(g)	감소율(%)	자동발화(°C)	평균 온도(°C)
1	시료A	1.59	1.44	90.57%	238	236.33±2.08SD
2		1.44	1.29	89.58%	234	
3		1.44	1.26	87.50%	237	
4	시료B	1.36	1.19	87.50%	233	231.67±4.04SD
5		1.83	1.59	86.89%	226	
6		1.55	1.25	80.65%	233	
7	시료C	1.14	1.11	97.37%	281	276.33±5.03SD
8		0.95	0.88	92.63%	271	
9		1.02	0.98	96.08%	277	

2) 축열 저장 시험 결과

목재펠릿 관련하여 자연발화로 인한 사고사례가 보고되고 있어, 앞서 소개한 축열 저장 시험 장비를 이용해서 자기발열 현상에 대한 시험을 실시하였다. 시료A와 시료B의 유사성을 고려하여 시료B에 대해서만 시험을 실시하였으며, 자기발열 현상이 다수 보고된 50 ℃조건에서 시험을 실시하였다. 시료는 500 ml 듀어병(Dewar flask)에 400 ml를 넣어 실시하였으며, 듀어병의 열 손실률은 물을 이용한 냉각 시험결과로부터 40~60 ℃ 구간에 대한 평균값인 0.0196 W/K를 사용하였다. 이는 총괄전열계수(U)와 열전달 면적(A)의 곱으로 표현되는 데이터이며, 물의 물성에 대해서는 참고자료를 인용하였다⁴⁾⁵⁾.

보편적으로 자기발열 현상은 자기분해나 산화로 인해서 발생하게 된다. 따라서 니콜라이 세묘노프의 이론이나, 프랑크 카메네츠키 이론을 기반으로 시험 결과를 분석하는 것이 보편적인 접근이다. 하지만 이번 시험의 경우에는 화학반응으로 인한 발열 현상이 아니고, 수분 증발로 인한 질량 감소 영향이 있기 때문에 두 이론으로는 접근할 수 없다. 따라서 열 수지에서부터 유도한 수식을 이용하였다. 먼저 자기발열 조건에서는 유입되는 열량이 없는 항온 조건이므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{generation} \approx \left(\frac{dE}{dt}\right)_{accumulation}$$

\dot{Q}_{out} : 계의 열 손실 속도
 $\dot{Q}_{generation}$: 계 내의 발열 속도
 $E_{accumulation}$: 계의 축적에너지 총량

4) 한국수자원공사. (2023). 상수도 관망 해석을 위한 수온별 물성 자료집 (K-water-2023-01). 한국수자원공사.

5) Lide, D. R. (Ed.). (2004). CRC handbook of chemistry and physics (85th ed.). CRC press.

듀어병에서 발생하는 열손실량과 물의 증발과 유출로 인한 열손실량으로 구분할 수 있으므로 식은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다. 다음 식에서 알 수 있듯이 듀어병 내부에서 수분 증발로 인한 질량 감소 속도를 확인하기 전에는 정확한 자기발열량 산정이 불가능하다. 따라서 현재 조건으로는 질량 감소 속도를 확인할 수 없으므로, 자기발열률(SHR, Self heating rate)을 산정하는 부분에 있어서는 질량 감소가 없는 조건과, 시료의 수분이 선형적으로 전량 감소하는 상황을 가정하여 실시하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{generation} &\approx \left(\frac{dE}{dt}\right)_{accumulation} + \dot{Q}_{thermalloss} + \dot{Q}_{evaporation} \\ &\approx \left[m(t)C\frac{dT}{dt} + T(t)C\frac{dm}{dt}\right] + UA\Delta T - H_{vap}\frac{dm}{dt} \\ &\approx m(t)C\frac{dT}{dt} + [T(t)C - H_{vap}]\frac{dm}{dt} + UA\Delta T \end{aligned}$$

- $Q_{generation}$: 계 내의 발열 속도
- $Q_{thermal loss}$: 열 손실 속도
- $Q_{evaporation}$: 수분 증발에 의한 열 손실 속도
- $E_{accumulation}$: 계의 축적에너지 총량
- U : 총괄 열전달 계수
- A : 열전달면적
- m : 질량
- T : 온도
- t : 시간
- H_{vap} : 증발잠열

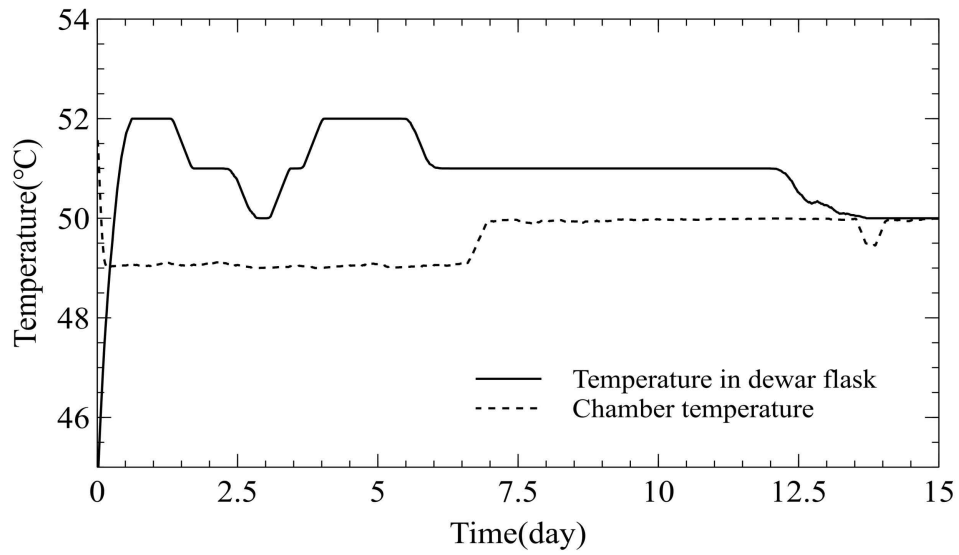
시험은 15일간 수행하였으며, 유의미한 자기발열 현상이 확인된 시험 결과는 [그림 V-16]과 같이 약 14일간 확인되었다. [그림 V-16]은 30초 단위로 측정된 1,000개 데이터별로 이동 평균을 적용한 결과이다. 그리고 수분이 충분히 있는 상태의 목재펠릿에 대해 실시한 결과로 기존 시료B의 조

건과는 다른 상태이며, 수분 충전 전의 시료는 119.3 g, 후의 시료는 223.8 g이었다. 계산상 비열은 다른 연구 결과를 활용하였으며, 연구 결과에서는 50 °C 구간에서 시차주사열량계 측정 결과는 수분 증발 효과가 커서 흡열이 발생하므로 105~145 °C 조건에 대한 데이터를 기준으로 약 1.265 J/g·K 비열을 제시하였다⁶⁾. 수분의 증발잠열은 50 °C에서 물의 증발잠열 2.382 MJ/kg을 적용하였다.

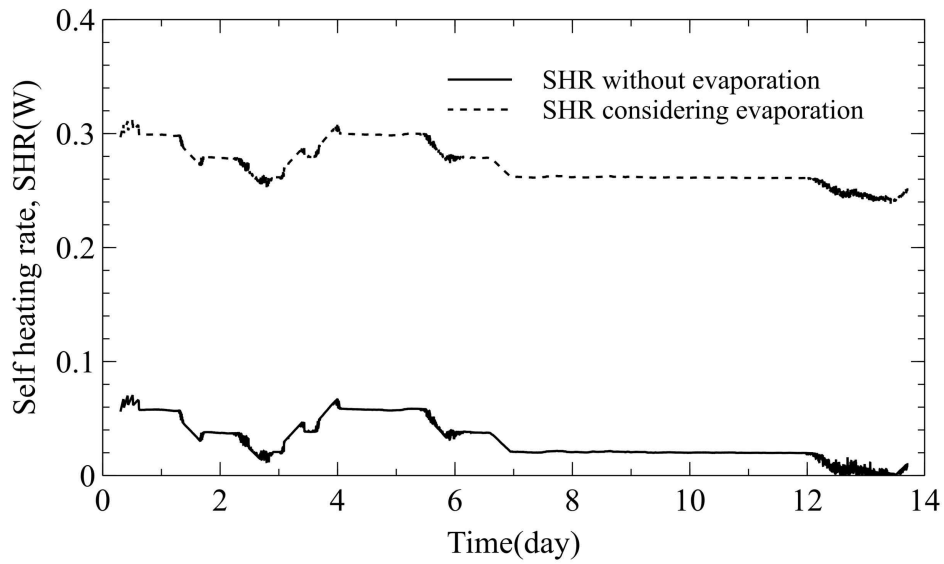
그 결과 [그림 V-17]과 같이 자기발열률을 산정할 수 있었으며, 시험 장비의 제약으로 정확한 수치를 산정한 것은 아니지만 목재펠릿의 자기발열률의 대략적인 최대, 최소 범위 정도는 추정할 수 있었다.

10 °C/min 속도로 측정한 열중량 분석 결과와 시차주사열량계 분석 결과에서 확인할 수 있듯이, 목재펠릿의 50 °C 구간은 수분 증발로 인한 흡열 구간이다. 다시 말해서 미생물 대사로 인해 발생하는 자기발열률이 수분 증발과 시험 용기의 열 손실로 인한 손실보다 커야만 온도 상승이 가능하다. 축열 저장 시험 장비로 측정한 결과 이런 발열 현상을 일부 확인할 수 있었으며, 실제 산업 현장에서 미생물 대사로 인해서 자기발열이 자연발화까지 이어지기 위해서는 밀폐 계를 형성하고, 계의 상대습도가 100%에 가까운 조건이 형성되어야만 가능할 것으로 추정할 수 있었다.

6) Collazo, J., Pazó, J. A., Granada, E., Saavedra, Á., & Eguía, P. (2012). Determination of the specific heat of biomass materials and the combustion energy of coke by DSC analysis. *Energy*, 45(1), 746-752.



[그림 V-16] 축열 저장 시험 결과



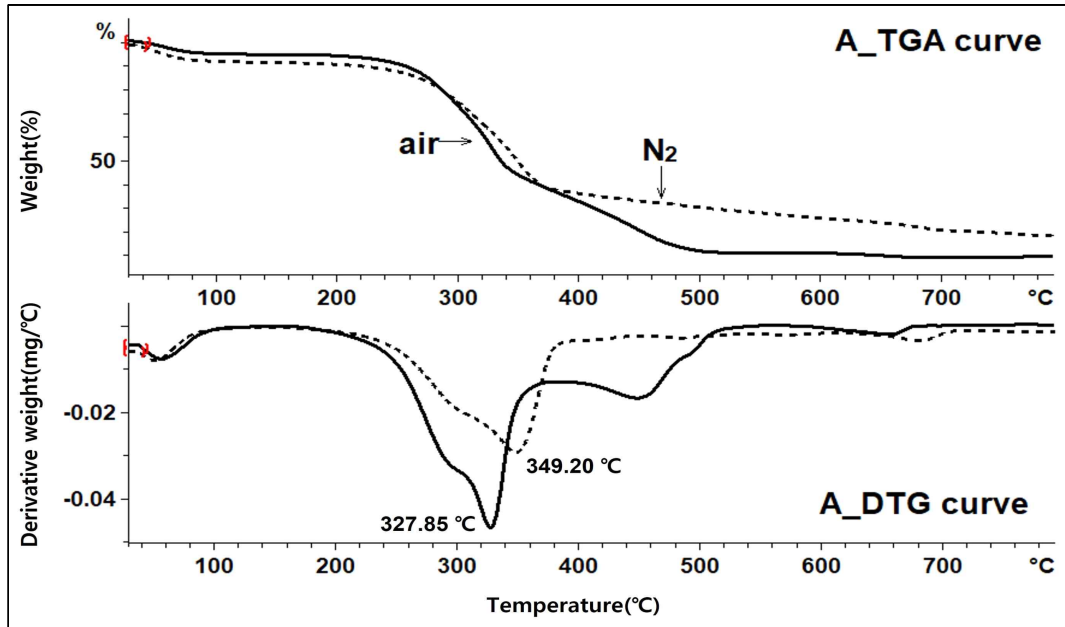
[그림 V-17] 자기발열률 환산 결과

3) 열중량 분석 결과

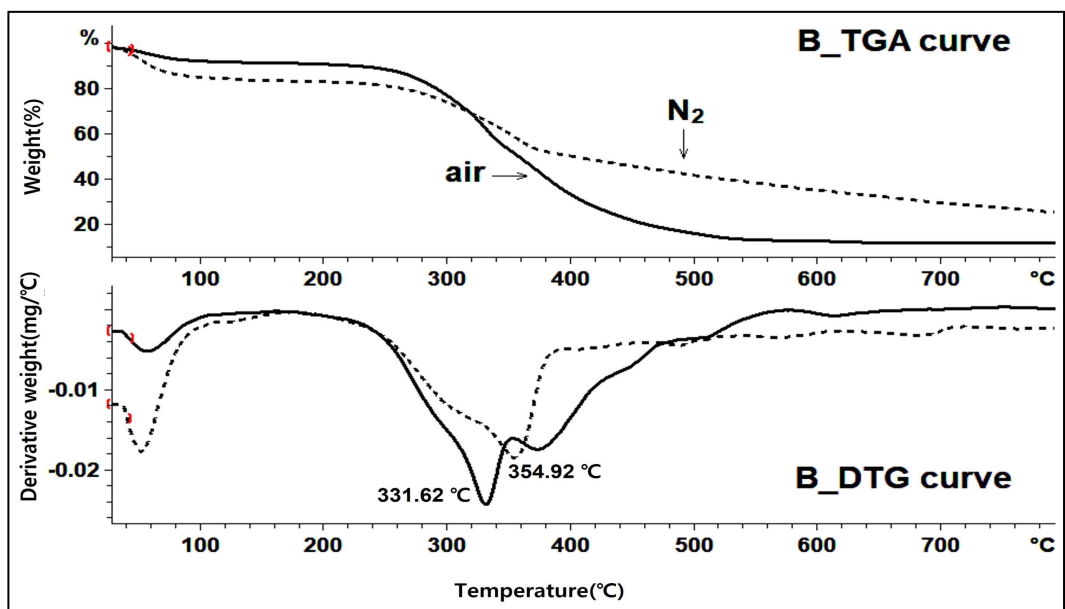
공기 및 질소 분위기에서 10 °C/min의 승온 속도로 30 ~ 800 °C의 범위로 가열한 결과를 <표 V-8>, [그림 V-18], [그림 V-19], [그림 V-20]에 나타내었다. 각 그림의 상단 그래프는 TGA(Thermal gravimetric analysis) 곡선으로 온도변화에 따른 시료의 질량 변화를 나타낸 것이다. 또한 각 그림의 하단 그래프는 DTG(Derivative thermo gravimetry) 곡선으로 온도에 따른 질량 변화량을 시각화한 그래프로, 수치가 표기된 피크는 중량감소 속도가 최대인 온도이다.

<표 V-8> 열중량 분석 결과

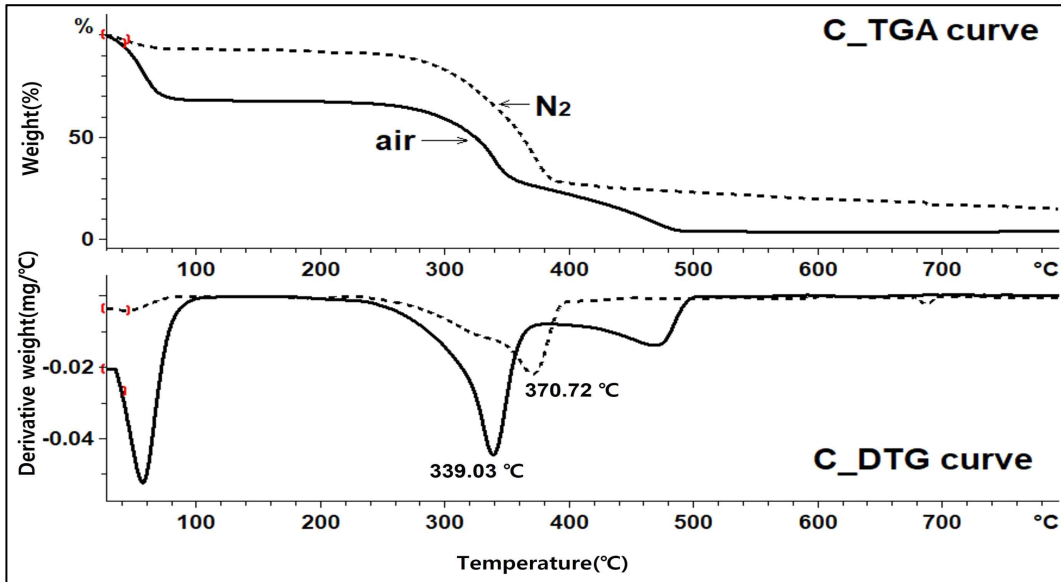
연번	대상	조건	단계	온도범위(°C)	질량변화율(wt%)
1	시료A	공기	1차	29 ~ 100	(-) 5
2			2차	193 ~ 508	(-) 83
3			3차	509 ~ 791	(-) 2 (residue 9.4%)
4		질소	1차	29 ~ 100	(-) 7
5			2차	192 ~ 393	(-) 54
6			3차	393 ~ 791	(-) 18 (residue 18.5%)
7	시료B	공기	1차	28 ~ 100	(-) 6
8			2차	191 ~ 567	(-) 78
9			3차	567 ~ 792	(-) 1 (residue 11.8%)
10		질소	1차	28 ~ 100	(-) 14
11			2차	191 ~ 394	(-) 32
12			3차	394 ~ 792	(-) 25 (residue 25.2%)
13	시료C	공기	1차	27 ~ 100	(-) 32
14			2차	190 ~ 501	(-) 64
15			3차	501 ~ 794	(-) 0.6 (residue 3.9%)
16		질소	1차	27 ~ 100	(-) 7
17			2차	190 ~ 400	(-) 64
18			3차	400 ~ 792	(-) 12 (residue 15.0%)



[그림 V-18] 시료A의 열중량 분석 결과



[그림 V-19] 시료B의 열중량 분석 결과



[그림 V-20] 시료C의 열중량 분석 결과

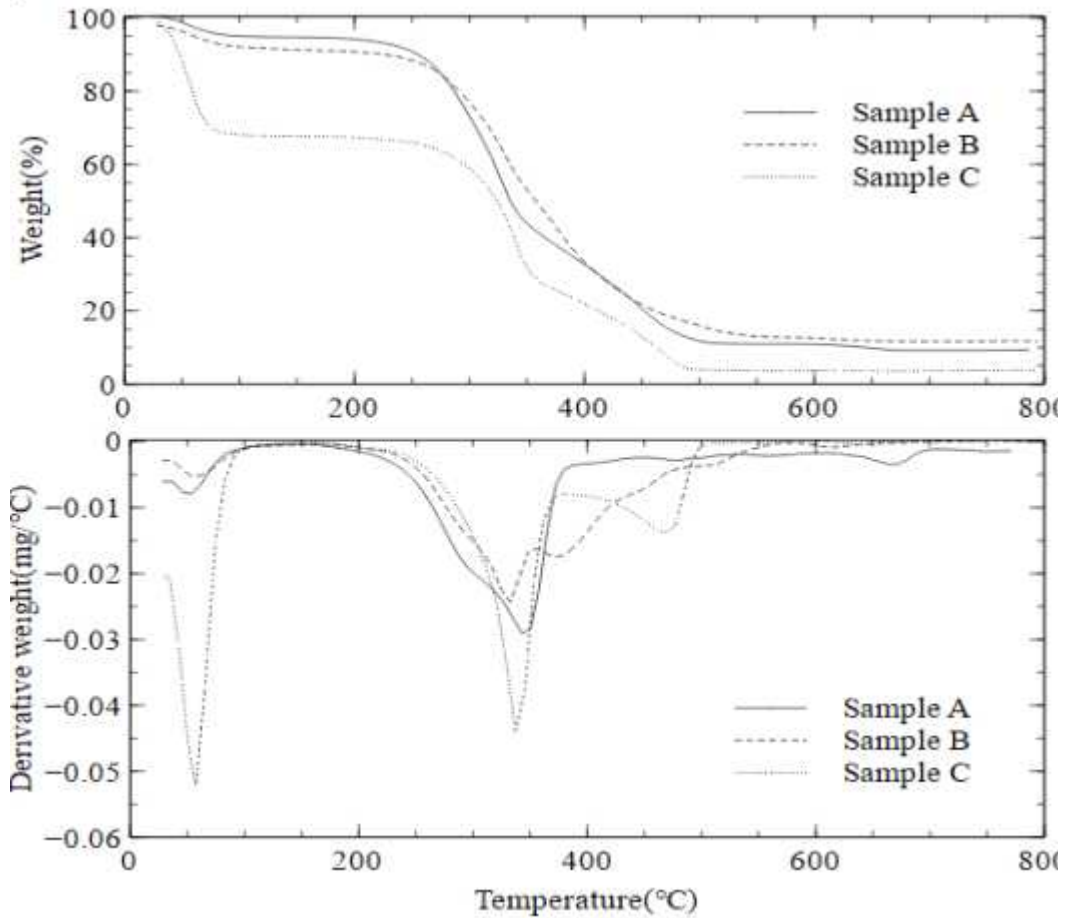
〈표 V-9〉에서와 같이 1차 온도 단계, 대략 27 ~ 100 °C는 수분 증발 단계로, 측정된 함수율은 시료A가 5 ~ 7 %로, 시료B는 6 %로, 시료C는 7 %이다. 1차 온도 단계에서 공기-질소 분위기 간의 측정 결과에서 차이가 발생하는 것으로 봐서, 시료B의 질소 분위기 측정 결과와 시료C의 공기 분위기 측정 결과의 경우 운반·보관 과정에서 수분 유입이 있었던 것으로 추정된다.

시료B는 목재펠릿 하역장 지하 컨베이어실 바닥에서 채취한 만큼 오염 가능성을 검토할 필요가 있으나, 주사전자현미경을 이용한 EDS(Energy dispersive X-ray spectroscopy) 분석 결과에서는 탄소와 산소만 확인 가능하였다. 아울러 [그림 V-21]에서와 같이 공기 조건에서의 시료A와 시료B는 유사한 질량 감소 경향을 확인 할 수 있었다.

〈표 V-9〉 함수율과 회분량 비교

구분	환경	시료A	시료B	시료C
함수율 (wt%)	공기	5	6	32*
	질소	7	14*	7
회분량 (wt%)	공기	9.4	11.8	3.9*
	질소	18.5	25.2*	15.0

* 수분 유입 추정 데이터



[그림 V-21] 열중량 분석 결과(공기 조건) 그래프 비교

4) 시차주사열량계 분석 결과

공기 분위기에서 10 °C/min의 승온 속도로 30 ~ 600 °C의 범위에서 가열한 결과를 [그림 V-22]에 나타내었다. 그림 상의 A, B, C는 시료A, 시료B, 시료C에 대한 시차주사열량계 시험 결과로 <표 V-10>에서와 같이 시료B, 시료A, 시료C 순서로 발열이 시작되었다. 외삽개시온도 또한 시료B, 시료A, 시료C 순서로 낮게 산출되었다.

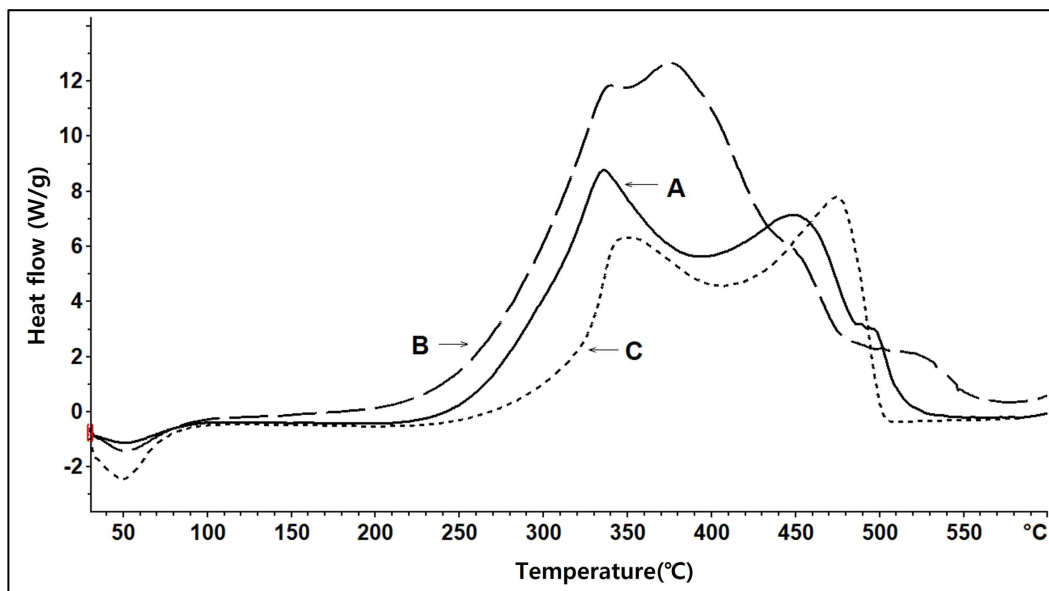
이런 발열 현상은 공기 분위기와 질소 분위기에서 열중량 분석 결과로부터, '산화 및 열분해'로 인해서 발생하였다고 설명할 수 있으며, 이때의 발열량 또한 시료B, 시료A, 시료C 순서로 많은 것으로 확인되었다. 앞서 언급한 바와 같이 시료A와 시료B는 유사한 시료라고 할 수 있으나, 시료B의 경우 장기 퇴적으로 인한 영향으로 발열량이 시료A 보다 크게 나온 것으로 추정된다.

참고로 일반적으로 소개되는 목재펠릿의 발열량은 KS M ISO 18125와 같은 표준에 따른 방법으로 고압산소 조건에서 측정된 수치라서 시차주사열량계로 측정한 값과는 차이가 있을 수밖에 없다.

<표 V-10> 시차주사열량계 측정 결과

구분	발열개시온도(°C)	외삽개시온도(°C)	발열구간 최대온도(°C)	발열량(J/g)
시료A	182	253	336	8,590
시료B	145	239	375	10,820
시료C	213	303	472	6,443

7) 공기 분위기에서는 산화, 산화분해, 열분해를 의미하고, 질소 분위기에서는 열분해를 의미함



[그림 V-22] 시차주사열량계 분석 결과

VI. 결과 고찰

.....

VI. 결과 고찰

1. 분진폭발 위험성

목재펠릿의 분진폭발 위험성 대해서 설명하기 전에, 앞서 시험을 통해 소개한 분진 최대폭발압력, 폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 최소점화에너지와 같은 시험 결과는 사실 기체나 액체의 특성과 같이 절대적인 값으로 해석해서는 안된다. 기본적으로 습도, 온도, 입도 분포, 초기 점화에너지, 수분 함량, 공기 중 산소의 농도, 분진운의 균질성 등 수 많은 변수를 항상 정확하게 특정할 수 없는 한계가 있기 때문이기도 하지만, 폭발이라는 현상의 특성과 고체 입자의 특성까지 영향을 미칠 수 있기 때문이라고 할 수 있다.

폭발이라는 현상은 기본적으로 난류 거동에 따라서 연소 효율이 크게 달라지는 현상이다. 매번 같은 난류 거동을 기대할 수 없듯이, 분진폭발 시의 연소 효율과 순간적인 발열 현상을 정확하게 산정할 수 없는 한계가 있다. 다음으로는 고체 입자에서 기인하는 문제인데, 기체나 액체 입자의 경우 지속적인 운동 상태인 반면, 고체 입자의 경우에는 운동이 자유롭지 않다.

이는 노출된 환경과 에너지 평형상태로 가기 위해서는 많은 시간이 필요하다는 의미이다. 예를 들면, 시료를 많이 흔들어서 분진폭발 시험을 하게 되면 시료를 흔들지 않았을 때와 다른 결과를 기대할 수 있다는 의미이다. 시험에 있어서 이런 수준까지 고체 입자를 특정한다는 것은 현행 기술로는 어려운 문제이다.

뿐만 아니라 현행 표준에 기반하는 분진폭발 시험 방법 또한 각각의 이론적 한계점을 가지고 있다. 그 결과 ‘가연성 분진’이라는 어원에 근거하여서 가연성 분진을 판단하는 것이 아니라, 합의에 기반한 기준에 따라서 가연성 분진을 판단하게 된다. 결론적으로 앞서 소개한 분진폭발의 시험값은 어디까지

지나 상대적인 값으로 이해하는 것이 바람직하다고 본다.

이런 제한된 범위에서 분진폭발의 특성이라고 하면 크게 두 가지로 구분한다. 하나는 얼마나 잘 폭발하는가와 같은 민감도 문제이고, 다른 하나는 폭발했을 때 어느 정도 강도 인가에 대한 문제이다. 폭발 강도에 대한 특성으로는 분진폭발최대압력과 폭발압력상승속도에 기반하는 폭연지수가 주로 활용되고 있으며, 폭발 민감도에 대해서는 폭발하한농도, 최소폭발에너지가 주로 활용되고 있다. 따라서 이런 두 가지 특성에 대해서 상대 비교를 통해서 분진폭발의 위험성을 평가하고자 하였다.

이번에는 상대적인 위험성 비교를 위한 물질로 목재분진(Wood dust), 무연탄(Anthracite coal), 역청탄(Bituminous coal)을 대상으로 하였으며, 비교 시험 결과는 국내외의 기존 논문 및 보고서, 독일 사회손해보험원의 산업안전보건연구원(IFA, Institute for occupational safety and health of German social accident insurance)에서 운영 중인 분진폭발 데이터베이스(Gestis-dust-ex)를 인용하였다. 해당 데이터는 부록으로 정리하였다.

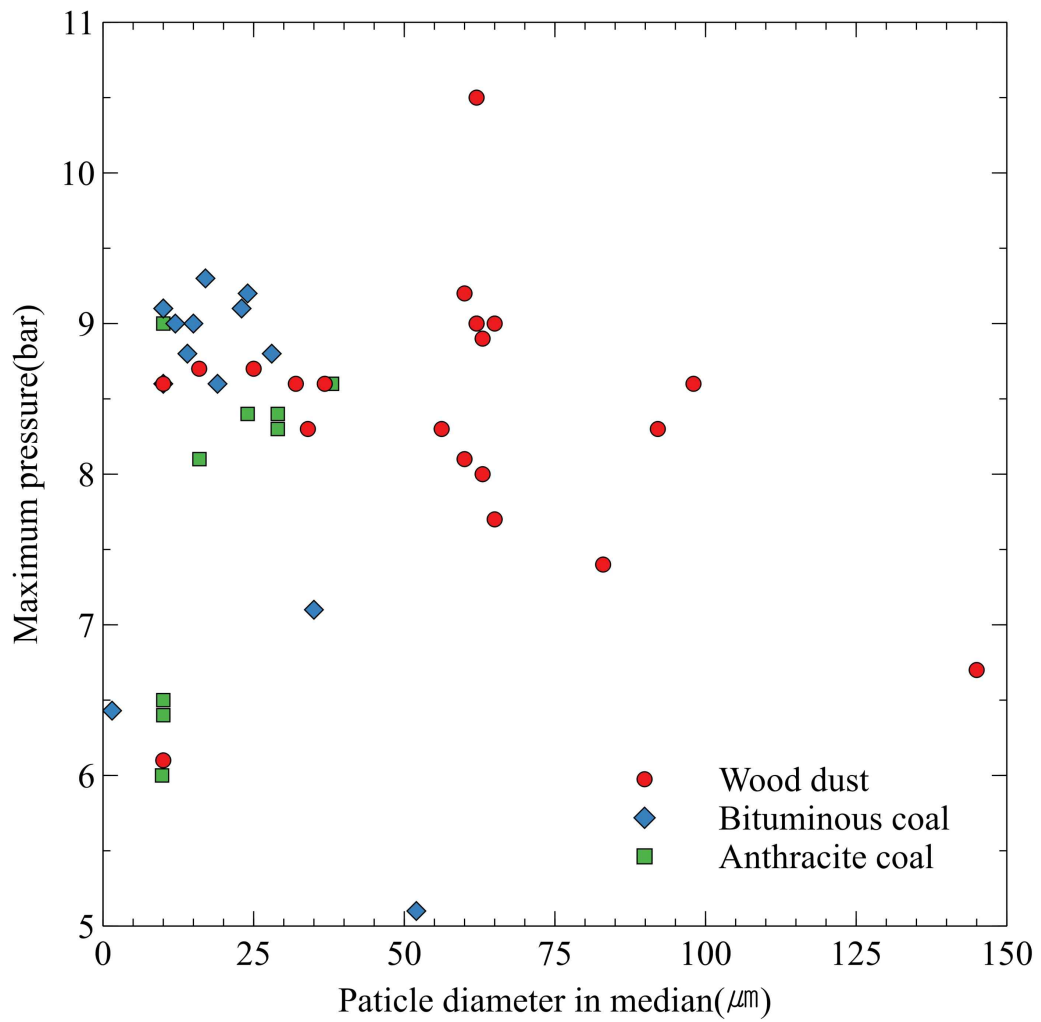
1) 최대폭발압력 비교

목재분진 21종, 무연탄 9종, 역청탄 14종에 대한 최대폭발압력 시험 결과를 [그림 VI-1]에 나타내었다. 그림에서와 같이 입도가 작을수록 분진폭발 강도가 세져야 하는 것이 일반적인 접근이지만, 분진폭발의 경우 다른 변수로 인한 영향이 크기 때문에 입도와의 상관관계를 추정할 수는 없었다.

앞서 제시한 목재펠릿 분진 시료A, 시료B, 시료C에 대한 d_{50} 기준 입도는 $0.620 \mu\text{m}$, $1.389 \mu\text{m}$, $314.1 \mu\text{m}$ 이고, 최대폭발압력은 7.6 bar, 6.9 bar, 6.2 bar로 측정되었으며, 추가 자료로 캐나다 목재펠릿 협회에서 2종 시료에 대해 측정한 결과 8.1 bar, 8.4 bar를 고려했을 때¹⁾, 최대폭발압력에 있어서

1) Melin, S.. "Testing of explosibility and flammability of airborne dust from

는 무연탄, 역청탄, 목재분진과 유사한 수준인 것으로 판단하였다.



[그림 VI-1] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최대폭발압력 자료 검토 결과

wood pellets". Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.

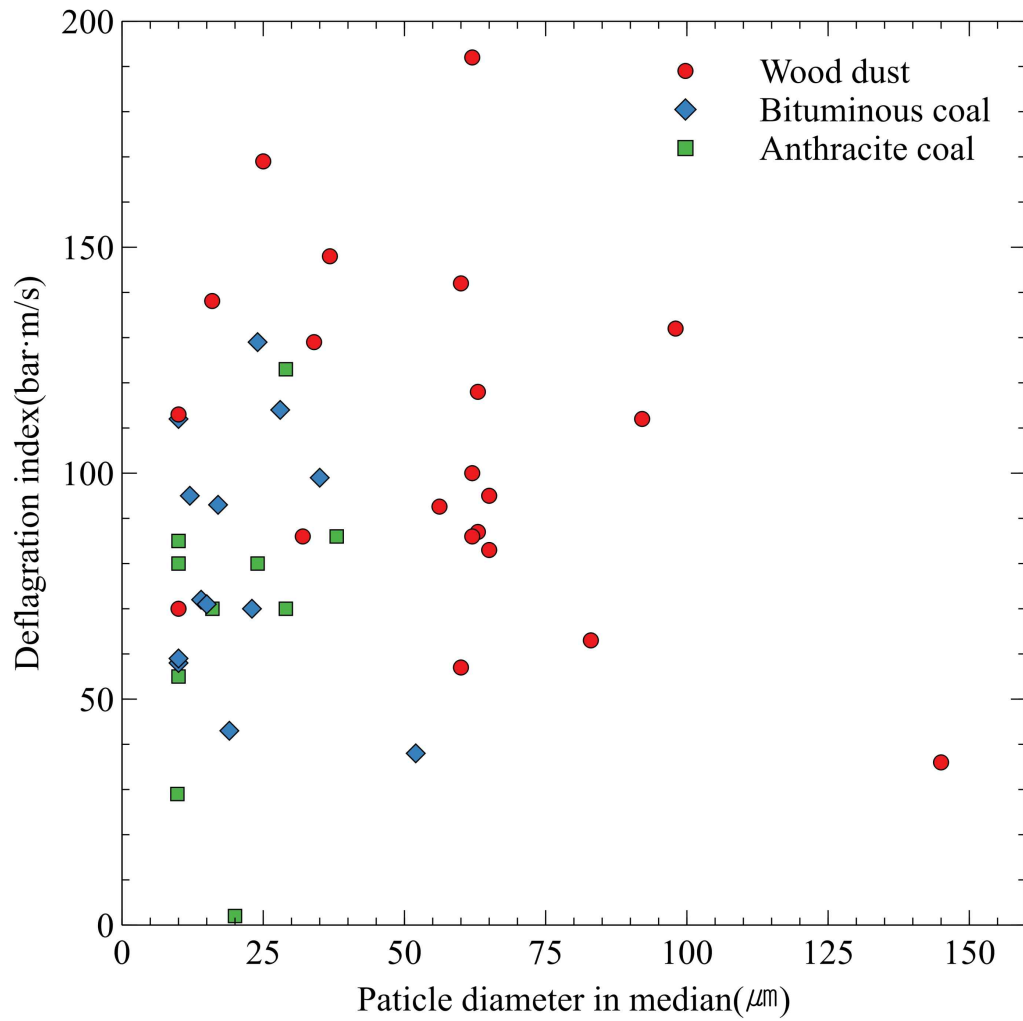
2) 폭연지수 비교

목재분진 21종, 무연탄 10종, 역청탄 13종의 폭연지수에 대한 다른 연구 결과를 인용하여 [그림 VI-2]를 작성하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 석탄계열 분진과 비교하였을 때, 목재계열 분진이 폭연지수가 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다.

앞서 제시한 목재펠릿 분진 시료A, 시료B, 시료C에 대한 d_{50} 기준 입도는 $0.620 \mu\text{m}$, $1.389 \mu\text{m}$, $314.1 \mu\text{m}$ 이고, 폭연지수는 각각 $109 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$, $101 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$, $23 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ 로 측정되었으며, 추가 자료로 캐나다 목재펠릿 협회에서 2종 시료에 대해 측정한 결과 $146 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$, 162 bar 를 고려했을 때²⁾, 목재펠릿 분진이라고 해서 목재분진보다 폭연지수가 높다고 할 수는 없지만, 석탄 계열 분진보다는 폭연지수가 높은 것을 확인할 수 있었다.

이런 특성은 폭연 등급을 산정하는데 있어서 보다 높은 등급으로 판정되는 상황이 석탄보다 많을 것으로 추정된다는 의미이고, 기존 석탄 취급 시스템을 목재펠릿으로 교체하는 경우 폭연벤트(Deflagration vent) 등 폭연지수를 기반으로 설계된 시스템은 재검토할 필요가 있다는 의미다.

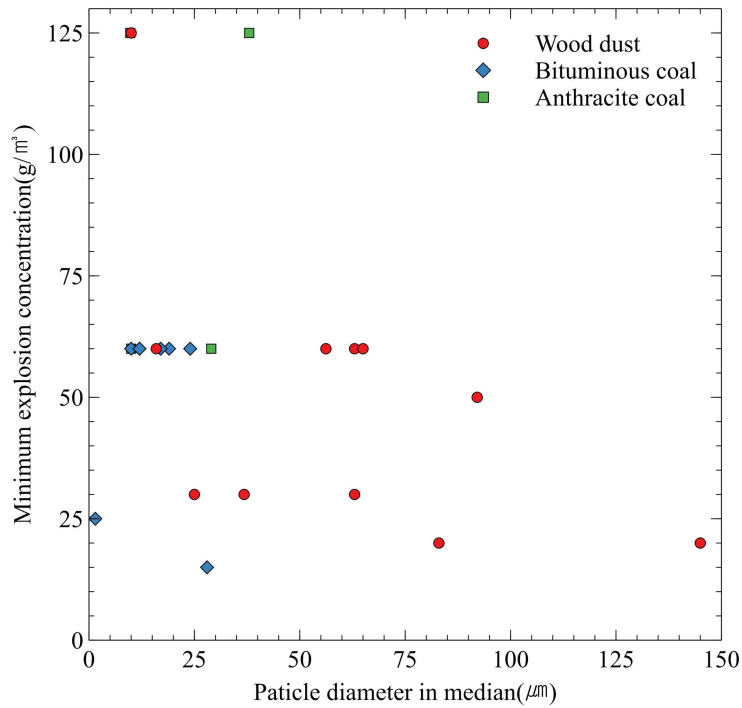
2) Melin, S.. Testing of explosibility and flammability of airborne dust from wood pellets. Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.



[그림 VI-2] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 폭발압력최대상승속도 자료 검토 결과

3) 폭발하한농도 비교

목재분진 11종, 무연탄 5종, 역청탄 7종의 폭발하한농도에 대한 다른 연구 결과를 인용하여 [그림 VI-3]을 작성하였다. 앞서 제시한 목재펠릿 분진 시료 A, 시료B, 시료C에 대한 d_{50} 기준 입도는 $0.620 \mu\text{m}$, $1.389 \mu\text{m}$, $314.1 \mu\text{m}$ 이고, 폭발하한농도는 각각 80 g/m^3 , 80 g/m^3 , 250 g/m^3 로 측정되었으며, 추가 자료로 캐나다 목재펠릿 협회에서 2종 시료에 대해 측정한 결과 70 g/m^3 , 70 g/m^3 로 측정된 점을 고려했을 때³⁾, 목재펠릿 분진 또한 목재, 석탄 계열 분진과 유사한 수준인 것으로 판단하였다.

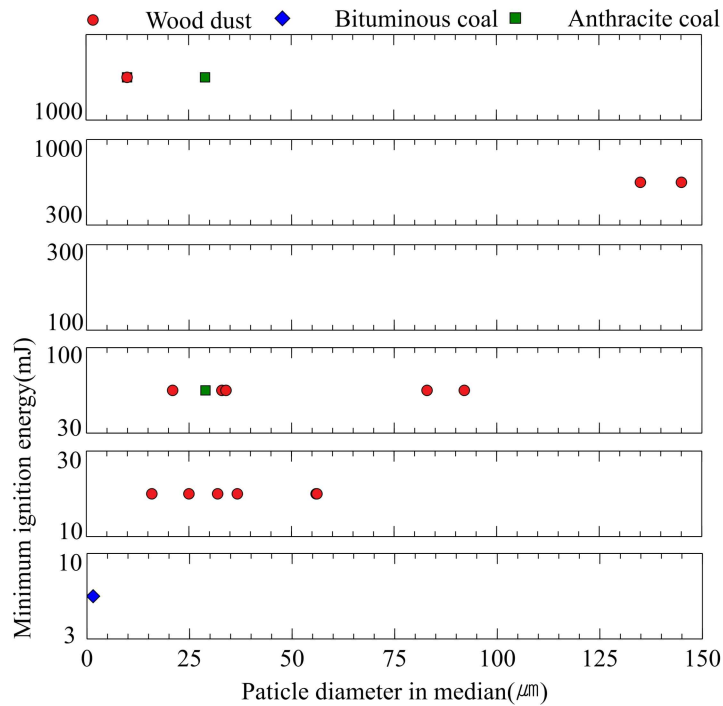


[그림 VI-3] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 폭발하한농도 자료 검토 결과

3) Melin, S.. Testing of explosibility and flammability of airborne dust from wood pellets. Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.

4) 최소점화에너지 비교

목재분진 15종, 무연탄 3종, 역청탄 1종의 최소점화에너지에 대한 다른 연구 결과를 인용하여 [그림 VI-4]을 작성하였다. 앞서 제시한 목재펠릿 분진 시료A, 시료B, 시료C에 대한 d_{50} 기준 입도는 $0.620 \mu\text{m}$, $1.389 \mu\text{m}$, $314.1 \mu\text{m}$ 이고, 최소점화에너지는 각각 $100 \sim 300 \text{ mJ}$, $300 \sim 1,000 \text{ mJ}$, $1,000 \text{ mJ}$ 초과로 측정되었으며, 추가 자료로 캐나다 목재펠릿 협회에서 2종 시료에 대해 측정한 결과 $10 \sim 30 \text{ mJ}$ 로 측정된 점을 고려했을 때⁴⁾, 목재펠릿 분진의 최소점화에너지는 목재분진과 유사한 수준인 것으로 판단하였다.



[그림 VI-4] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최소점화에너지 자료 검토 결과

4) Melin, S.. Testing of explosibility and flammability of airborne dust from wood pellets. Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.

5) 분진운의 최소 점화 온도 비교

앞서 목재펠릿 분진의 자동발화온도에 측정 결과를 소개하였다. 이런 자동 발화 온도는 어디까지나 목재펠릿 분진이 정적인 상태에 있을 때의 물리적 특성을 의미한다. 물론 자동발화온도 또한 가열속도, 시료의 질량이나 부피에 따라서 전혀 다른 열적 평형계를 가지게 되면서, 조건에 따라서는 전혀 다른 결과를 도출하게 되는 한계가 있지만, 특히 분진운의 경우에는 전혀 다른 물리적 특성을 보이게 된다.

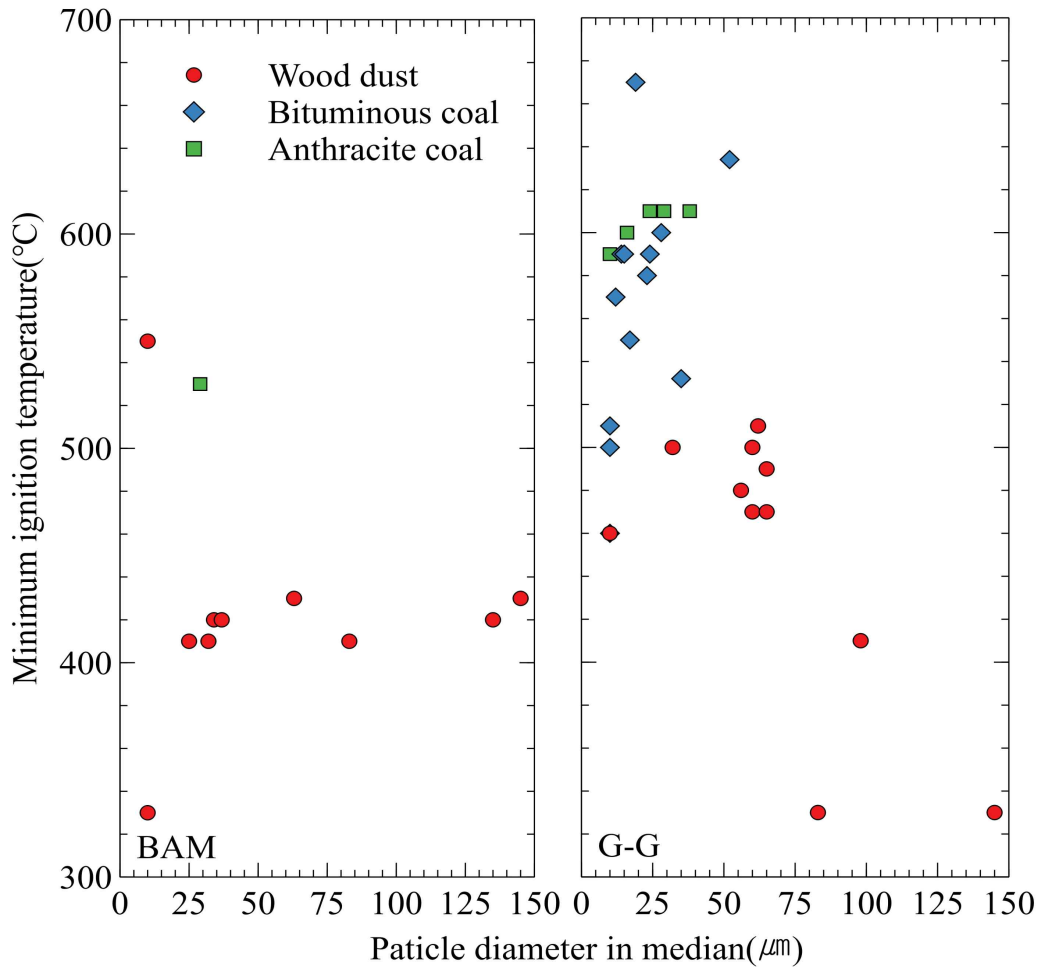
분진운을 형성하게 되는 경우에는 고체라기 보다는 오히려 가연성 기체 거동과 유사한 특성을 보이게 된다. 그 결과 분진폭발 현상을 설명하는 이론 또한 사실 가스폭발 이론을 기반으로 하고 있다. 따라서 분진운의 최소 점화 온도 또한 정적인 상태에 있는 분진을 서서히 가열하며 측정한 방식과는 전혀 다른 결과가 도출되게 된다.

이런 이유로 분진운의 최소 점화 온도를 별도로 측정하게 되는데, 크게 2가지 시험방법이 많이 활용되고 있다. 하나는 독일연방재료시험연구소(BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung)에서 제안한 BAM오븐 장비이고, 하나는 영국의 Godbert와 미국의 Greenwald가 제안한 G-G오븐 장비이다. 두 장비 모두 ISO/IEC 80079-20의 범위에서 적용되고 있는 장비이지만, BAM오븐 장비가 보다 낮은 최소 점화 온도를 보이는 것이 일반적이다.

BAM오븐 장비는 수평 형상이고, G-G오븐 장비는 수직이라는 차이도 있고, 기본적으로 오븐의 크기에서 발생하는 차이도 있겠지만, G-G오븐은 오븐내 고온 벽면만을 통해서 열전달을 하는 반면, BAM오븐의 경우에는 오븐내 임팩트 플레이트(Impact plate)가 있어서 난류 거동을 유도하고 열전달을 촉진하는 기능을 하기 때문인 것으로 판단된다.

사실 목재펠릿 분진 시료에 대한 최소 점화 온도를 직접 측정한 것은 아니지만, 그간 측정한 목재펠릿 분진의 물리적 특성이 목재계열 분진과 큰 차

이가 확인되지 않았고, 또 석탄 계열 분진과 비교하는 점이 분진폭발 예방에 있을 것으로 판단해, 목재분진 21종, 무연탄 6종, 역청탄 13종의 최소 점화 온도를 [그림 VI-5]와 같이 비교하여 보았다. 그림에 따르면 목재계열의 분진이 석탄계열의 분진보다 최소 점화 온도가 대체적으로 낮은 경향을 확인 할 수 있었다.



[그림 VI-5] 목재, 무연탄, 역청탄 분진의 최소 점화 온도 자료 검토 결과

6) 분진폭발 위험성 평가 결과

목재펠릿 분진의 분진폭발 위험성 평가를 위해서 목재분진, 무연탄, 역청탄을 비교 대상으로 최대폭발압력, 폭연지수, 폭발하한농도, 최소점화에너지에 대해서 비교·검토하였다. 레이저 회절 분석 방식의 입도분석 결과, d_{50} 기준 입도가 시료A, 시료B의 경우 $0.620 \mu\text{m}$, $1.389 \mu\text{m}$ 로 상대적으로 작은 수준이라, 분진폭발의 강도나 민감도가 목재분진 보다 높을 것으로 예상되었으나, 시험 결과 목재분진과 유사한 수준인 것으로 검토되었다. 이는 캐나다 목재펠릿 협회에서 실시한 2종 시료에 대한 결과 또한 유사하게 검토되어, 이런 시험 결과의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

또한, 주로 화력 발전용으로 많이 사용되는 무연탄, 역청탄의 경우에도 목재펠릿 분진폭발 특성과 유사한 수준인 것으로 확인되었다. 다만 집진기 등의 설계 기초자료로 활용되는 폭연지수나 분진운의 최소 점화 온도의 경우, 목재분진이 석탄 계열의 분진보다 상대적으로 위험한 것으로 검토되어, 이 부분에 대해서는 공장 설계·취급 시에 보다 깊이 있는 검토가 필요하다고 본다.

7) 분진폭발 위험성

가스나 증기의 경우에는 분진과 달리 최대폭발압력이나 폭발압력상승속도와 같은 폭발 강도를 측정하는 경우는 찾아보기 힘들다. 이는 가스나 증기의 경우 이너팅(Inerting)이라는 방법을 이용하여 폭발까지 가는 위험을 1차 제어하는 것이 현대 산업계에서의 보편적인 접근 방법이기 때문이다.

한편 분진의 경우에는 이런 이너팅 방식을 적용하는데 한계가 있다. 따라서 가스나 증기와는 달리 폭발 상황을 가정하고 관련 설비를 설계하는 것이 보편적인 접근이다. 결과적으로 단순히 분진의 특성을 이해하고 비교하고자 폭발 강도 시험을 실시하는 것이 아니라, 실제 관련 설계 데이터로 활용하는

것을 1차 목적으로 한다.

이런 설계상의 반영이라고 하면, 여러 가지 방법이 검토될 수 있겠으나, 산업적으로는 주로 폭발 시의 압력을 안전한 방향으로 해소하면서, 2차 폭발 및 연쇄적인 폭발을 막는 방법이 주로 사용되고 있다. 미국의 임페리얼 설탕 공장 사고와 같이 그간 보고 되어온 대형 분진폭발 사고의 경우 1차 폭발에서 문제가 발생한 것이 아니라, 1차 폭발로 인해 형성된 분진운이 연이어 폭발하면서 피해가 커진 것이 문제였다.

그러므로 분진을 취급하는 공정에 있어서는 각 구역별이나, 설비별로 폭발이 발생했을 때, 어떻게 폭발압력을 해소할지를 검토해야 한다. 그래야만 [그림 VI-6]과 같이 폭발이 전파되는 상황을 막을 수 있다⁵⁾. 해당 사고는 2024년 1월 일본 아이치현 소재 목재펠릿·석탄 혼소 화력발전소에서 발생한 목재펠릿 분진폭발 사고로, 복구에만 약 1년 가까이 소요되어, 2025년 1월 경에나 재가동할 수 있었다.



[그림 VI-6] 일본 아이치현 목재펠릿 혼소 화력발전소 사고 영상(CBC뉴스 사진 인용)

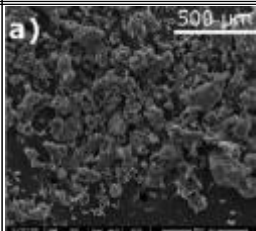
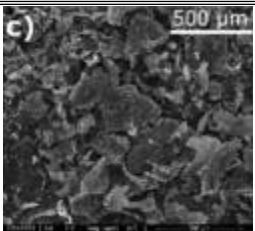
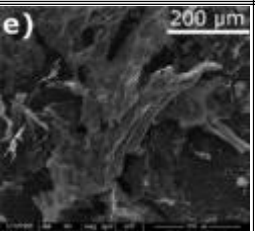
5) 주식회사 JERA, 타케토요 화력발전소의 화재 사고에 대해, 지역 주민 설명자료, 2024.05.25. (株式会社JERA, 武豊火力発電所における火災事故について, 地域の皆さまへのご説明資料)

2. 질식·중독, 가스폭발 및 자연발화 위험성

1) 목재의 구성 성분

목재의 구성 성분은 <표 VI-1>과 같이 크게 셀룰로스(Cellulose), 헤미셀룰로스(Hemicellulose), 리그닌(Lignin), 이 3가지로 구분되게 되며, 이외에도 테르펜 등 다양한 유기 성분으로 구성되어 있다⁶⁾. 따라서 목재펠릿 제조나 취급 과정에서 발생하는 분진 또한 이런 유기 성분으로 구성되어 있다고 볼 수 있다.

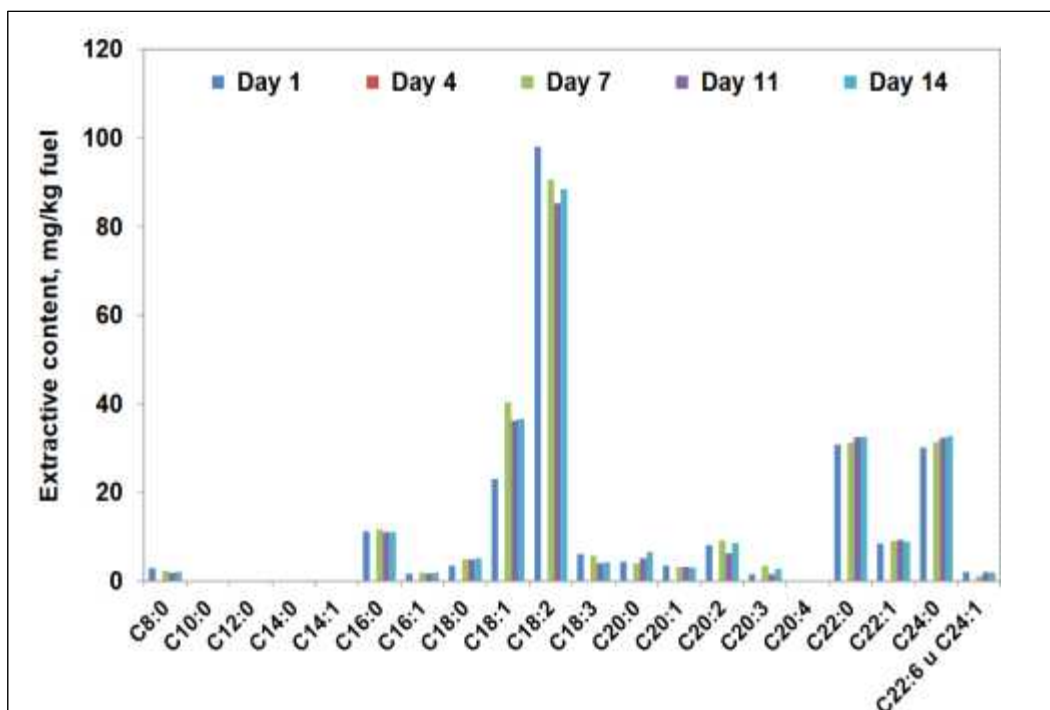
<표 VI-1> 목재의 주요 구성 성분

연번	셀룰로스	헤미셀룰로스	리그닌	비고
전자현미경 사진				논문자료 인용 ⁷⁾
설명	선형 다당류로 식물 세포벽의 주요 구성 물질	자일로스, 만노스, 갈락토스 등 비선형적인 형태의 다당류 식물 성분	식물의 압축강도, 방수성 등을 유지하는 방향족 성분으로 주로 껍질층에 많이 분포하고 있음	-

6) Rugar-Gadd, Katarina. "Biomass pre-treatment for the production of sustainable energy: emissions and self-ignition". Diss. Växjö University Press, 2006.

7) Magalhães, Duarte, et al. "Prediction of yields and composition of char from fast pyrolysis of commercial lignocellulosic materials, organosolv fractionated and torrefied olive stones". Fuel 289 (2021): 119862, 2021.

Emhofer는 아세톤, 헥산 등의 용제를 이용하여 14일간 목재펠릿 4종에 대해 유기 성분 추출 시험을 수행하였다. 성분 분석 결과 [그림 VI-7]과 같이 C8에서부터 C24까지 분포하고 있는 것으로 확인되었으며, 4종에 대한 시험 결과가 동일하게 C18의 함량이 가장 높은 것으로 확인되었다⁸⁾.



[그림 VI-7] 유기 성분 추출 시험 결과 자료⁹⁾

2) 질식·중독 가스 및 가연성 가스 발생, 자연발화의 원인

목재펠릿이나 목재칩을 제조·취급·저장·운반하는 과정에서 <표 III-11>에

- 8) Emhofer, Waltraud. Emissions from wood pellets during storage. Diss. Technische Universität Wien, 2015.
 9) Emhofer, Waltraud. Emissions from wood pellets during storage. Diss. Technische Universität Wien, 2015.

서와 같이 질식·중독, 가스폭발, 자연발화로 인한 사고가 지속적으로 보고되어 왔다. 이런 사고는 크게 두 가지 현상에서 시작되는 것으로 보고되고 있다. 하나는 목재 세포의 유산소 호흡이고 또 다른 하나는 균이나 세균에 의한 미생물 대사라고 할 수 있다. 연구 결과 유산소 호흡과 미생물 대사로 인해 일산화탄소, 이산화탄소뿐만 아니라 VOC(Volatile organic compounds) 까지 발생하는 것으로 확인되었다¹⁰⁾.

또한 이때 발생한 가스가 누적되면서 질식·중독, 가스폭발 사고가 발생하게 되고, 유산소 호흡과 미생물 대사 과정에서 발생한 열이 방출되지 못하고 축적되면서 화학적 산화과정을 거쳐서 자연발화까지 이어지게 된다. 사실 유산소 호흡과 미생물 대사, 이 두 가지 현상으로 인해 생성된 가스가 유사하기 때문에, 명확히 구분해서 ‘유산소 호흡으로 인한 가스 발생량은 얼마이고, 미생물 대사로 인해 발생한 가스는 얼마이다.’, 이런 식으로 정량적인 분석을 하기에는 어려운 점이 있다¹¹⁾. 따라서 목재계열 분진에서 가스 발생 현상이나, 발열 현상을 검토하는 과정에서는 두 가지 현상을 항상 병행해서 검토해야 한다.

(1) 목재계열 분진의 유산소 호흡

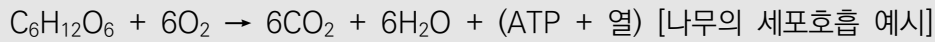
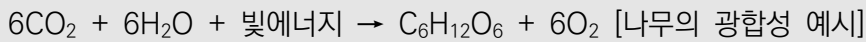
목재계열 분진은 나무로부터 기인한 일종의 생물학적 세포이다. 하지만 이미 생식 능력이 없는 상태라고 할 수 있다. 다시 말해 이산화탄소와 물을 흡수하고 산소를 만들어 내는 광합성 작용으로 인한 영양을 더 이상 공급 받을 수 있는 상태가 아니라는 의미이다. 하지만 나무로써 죽은 세포이지 세포의 관점에서 단정적으로 죽은 세포라고는 할 수 없다. 잘려지기 전과 같이 세포로서의 유산소 호흡을 하는 상태라고 할 수 있다.

10) Kubler, H. A. N. S. "Heat generating processes as cause of spontaneous ignition in forest products". 301-327, 1987.

11) Kubler, H. A. N. S. "Heat generating processes as cause of spontaneous ignition in forest products", 301-327, 1987.

[나무의 유산소 호흡]

흔히 나무는 광합성을 통해서 이산화탄소를 흡수하고 산소를 공급하면서 에너지를 얻으며 살아가는 것으로 알고 있으나, 사실 이산화탄소와 물을 통해서 포도당을 만들고 세포호흡 과정에서 포도당이 산화>분해되면서 에너지를 흡수하게 된다. 물론 잎을 유지하고 있는 성장 과정에서는 세포 호흡량보다 광합성의 양이 월등히 많은 것으로 알려져 있으나, 흔히 죽거나 병든 상태에서는 광합성을 하는 양이 없거나, 미약해서 상대적으로 세포호흡의 양이 월등히 높아지면서, 이산화탄소 발생원으로 작용한다.



앞서 언급한 바와 같이 나무는 다양한 세포로 구성되어 있고, 세포호흡 과정에서 이산화탄소는 물론이고, 일산화탄소, VOC를 발생시키게 된다. 특히 이런 세포호흡은 고온·다습 환경에서 2 ~ 4개월까지도 유지되는 것으로 보고되고 있으므로¹²⁾, 특히 목재칩을 취급하는 경우에는 세포호흡으로 인한 현상을 반드시 고려해야 한다고 본다.

한편 고온·고압 공정을 거쳐 생산되는 목재펠릿과 그 분진까지 영향이 있을지 가능성은 사실 극히 낮다고 할 수 있다. 하지만 충분히 검토할 필요성이 있는 이유가 목재펠릿을 취급하는 경우 목재칩 또한 같이 취급하게 되는 사례가 많기 때문이라고 할 수 있다.

(2) 목재펠릿의 미생물 대사

보통 ‘무산소 조건’에서 미생물이 유기물을 분해하면서 에너지를 얻는 과정을 발효라고 한다. 목재펠릿 관련 연구에서 이해를 돕기 위해 ‘발효(Fermentation)’라는 표현을 사용하는 경우가 많지만, 실제 죽은 나무에서는

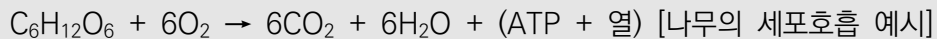
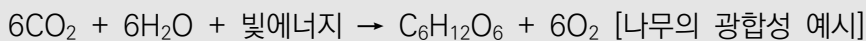
12) Springer, E.L., Hajny, G.J., Feist, W. C., “Spontaneous heating in piled wood chips”, Tappi 53(1)85-86, 1969.

혐기성 미생물만 있는 것이 아니라, 호기성 미생물 또한 동시에 존재한다. 다시 말해 ‘발효’는 일종의 유기물 ‘무산소 분해(Anaerobic decomposition) 현상’의 종류일 뿐이고, 보다 정확한 표현은 가장 포괄적 개념인 ‘미생물 대사(Metabolism of microorganisms)’라고 할 수 있다.

연구 결과에 의하면 실제로 건조된 나무 1 kg에는 80억 개의 균체가 살고 있다고 한다. 또한 이런 균체는 통상 수개월 내에 10 ~ 100배 정도 증식한다고 하며, 많게는 8,000배까지도 증식한다고 한다¹³⁾. 증식 과정에서는 <표 VI-2>와 같은 호기성·혐기성 분해 과정을 거치게 되며, 공기 중에 노출되어 산소가 충분한 경우에는 주로 호기성 분해를 하게 되고, 흙 속과 같이 산소가 부족한 조건에서는 혐기성 분해가 주로 발생하게 된다.

[나무의 유산소 호흡]

흔히 나무는 광합성을 통해서 이산화탄소를 흡수하고 산소를 공급하면서 에너지를 얻으며 살아가는 것으로 알고 있으나, 사실 이산화탄소와 물을 통해서 포도당을 만들고 세포호흡 과정에서 포도당이 산화>분해되면서 에너지를 흡수하게 된다. 물론 잎을 유지하고 있는 성장 과정에서는 세포 호흡량보다 광합성의 양이 월등히 많은 것으로 알려져 있으나, 흔히 죽거나 병든 상태에서는 광합성을 하는 양이 없거나, 미약해서 상대적으로 세포호흡의 양이 월등히 높아지면서, 이산화탄소 발생원으로 작용한다.



밀폐계 목재의 미생물 대사에 대해 연구한 결과에 의하면 산소 농도 21% 조건에서 호기성 분해로 인해서 산소 농도가 1%까지도 낮아질 수 있는 것으로 보고되었다¹⁴⁾. 물론 이런 미생물 대사는 습도와 같은 환경 요인에 따라서

13) Thörnqvist, T., “Storage of disintegrated logging residues”, Rapport, Institutionen för Virkeslära, Sverges Lantbruksuniversitet no. 133. p. 62, 1983.

14) Bergman, O.; Nilsson, T. “Outside storage of Birch chips at Morrum's

달라 질 수 있다. 목재 계열 분진의 경우에는 수분을 20% 이상까지도 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이는 공기의 상대습도 89%에 해당하는 수치이므로 미생물이 성장하기에 충분한 습도로 판단되고 있다¹⁵⁾.

〈표 VI-2〉 목재 성분의 호기성·혐기성 분해

성분	호기성 분해	혐기성 분해	비고
셀룰로스 헤미셀룰로스	$(C_6H_{10}O_5)_n + n \cdot 6CO_2$ → $n \cdot 6CO_2 + n \cdot H_2O + Energy$	$(C_6H_{10}O_5)_n$ → 유기산 + 알코올 + $CO_2 + CH_4 + Energy$	유기산 (아세트산, 젖산 등)
리그닌 분해	Lignin + O_2 → $CO_2 + H_2O +$ 유기 분자	Lignin → $CO_2 + CH_4 +$ 유기 분자	리그닌 종류가 다양해서 특정 불가

(3) 미생물 대사로 발생하는 가스

목재펠릿을 대상으로 가스 발생량을 측정한 연구 결과는 사실 그렇게 많지는 않다. 따라서 발생 가스량이 대략 어느 정도 수준이고, 또 어떤 조건에 따라서 차이가 있는지를 이해하는 수준이지, 절대적인 기준이 제시될 수 있는 것이 아니므로 이런 시험 결과를 현장에 적용해서는 안된다. 아울러 이런 시험에 있어서 미생물의 종류나, 그 숫자를 특정하는 것 자체가 어렵기 때문에 사실상 향후에도 관련 기준이 제시될 것으로 예상되지는 않는다.

따라서 이런 제한된 범위에서 미생물 대사 과정에서 발생하는 가스에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다. Kuang 등은 플라스틱 통 내부에서 밀폐 상태로 목재펠릿의 가스 발생량을 측정하였다. [그림 VI-5]은 측정 결과를 그대

sulphate mill”, Rapport, Institutionen för Virkeslära, Sverges Lantbruksuniversitet no. 60. p. 104, 1968.

15) Walker, Ian K. "The role of water in spontaneous combustion of solids." Fire research abstracts and reviews. Vol. 9. No. 1. 1967.

로 인용한 내용이다. 그림에서와 같이 이산화탄소, 일산화탄소, 메탄 가스의 발생을 확인할 수 있었으며, 온도 상승에 따라 발생량이 증가하는 경향 또한 확인할 수 있었다. 그림에서 검은색 마커는 수분이 없는 상태를, 흰색 마커는 수분이 충분한 상태를 의미하며, 수분 조건에서 가스 발생량이 상대적으로 많은 것을 확인할 수 있었다¹⁶⁾.

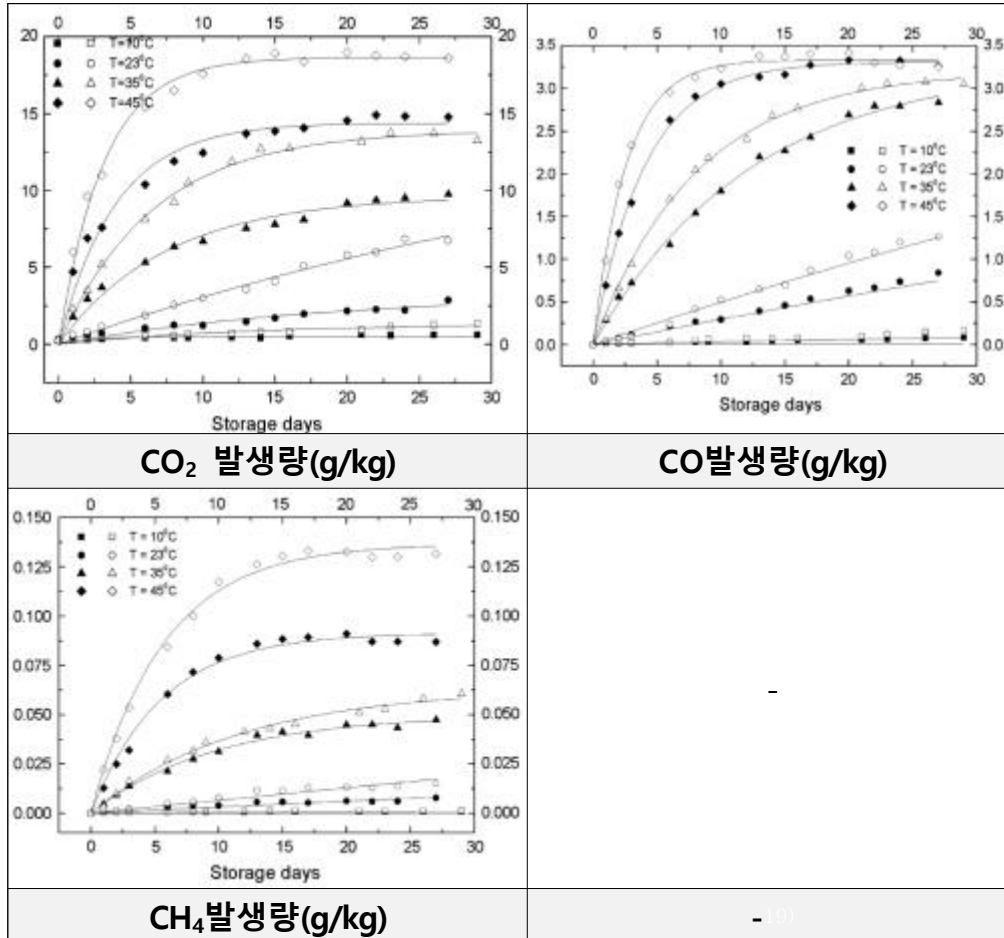
유사 연구로 Emhofer의 연구 결과를 비교한 결과, 앞서 설명한 경향성은 확인되었으나, Kuang 등의 연구 결과에서는 이산화탄소의 발생량이 많게는 17 g/kg 이상인 것으로 확인되지만, 다른 연구 결과에서는 kg당 mg 범위에서 이산화탄소가 발생한 것으로 측정되었다¹⁷⁾. 따라서 미생물 대사에 의해서 발생하는 현상인 만큼 가스 발생량은 균이나 세균의 종류, 숫자의 영향이 굉장히 큰 것으로 추정된다.

아울러 VOC의 발생량은 이산화탄소, 일산화탄소에 비해서 상대적으로 작은 것으로 검토되었으며, 연구 결과에 따르면 메탄올(Methanol), 펜테인(Pentane), 펜타날(Pentanal), 헥사날(Hexanal) 4가지 성분 중에서는 메탄올의 발생량이 가장 많은 것으로 보고되었다. 메탄올의 경우에는 한 달간 측정된 결과 최대 250 ppb 수준까지 발생하는 것으로 확인되었으며, 4종 VOC 모두 ppb 수준으로 발생한 것으로 확인되었다¹⁸⁾.

16) Kuang, Xingya, et al. "Rate and peak concentrations of off-gas emissions in stored wood pellets—sensitivities to temperature, relative humidity, and headspace volume." *Annals of Occupational Hygiene* 53.8, 789-796, 2009.

17) Emhofer, Waltraud. "Emissions from wood pellets during storage". Diss. Technische Universität Wien, 2015.

18) Soto-Garcia, L., Ashley, W. J., Bregg, S., Walier, D., LeBouf, R., Hopke, P. K., & Rossner, A., "VOCs emissions from multiple wood pellet types and concentrations in indoor air". *Energy & Fuels*, 29(10), 6485-6493, 2015.



※ 오픈 심벌은 수분 보유상태, 닫힌 심벌은 수분이 없는 상태

[그림 VI-8] 가스 발생량 측정 결과²⁰⁾

19) Kuang, Xingya, et al. "Rate and peak concentrations of off-gas emissions in stored wood pellets—sensitivities to temperature, relative humidity, and headspace volume." *Annals of Occupational Hygiene* 53.8, 789-796, 2009.

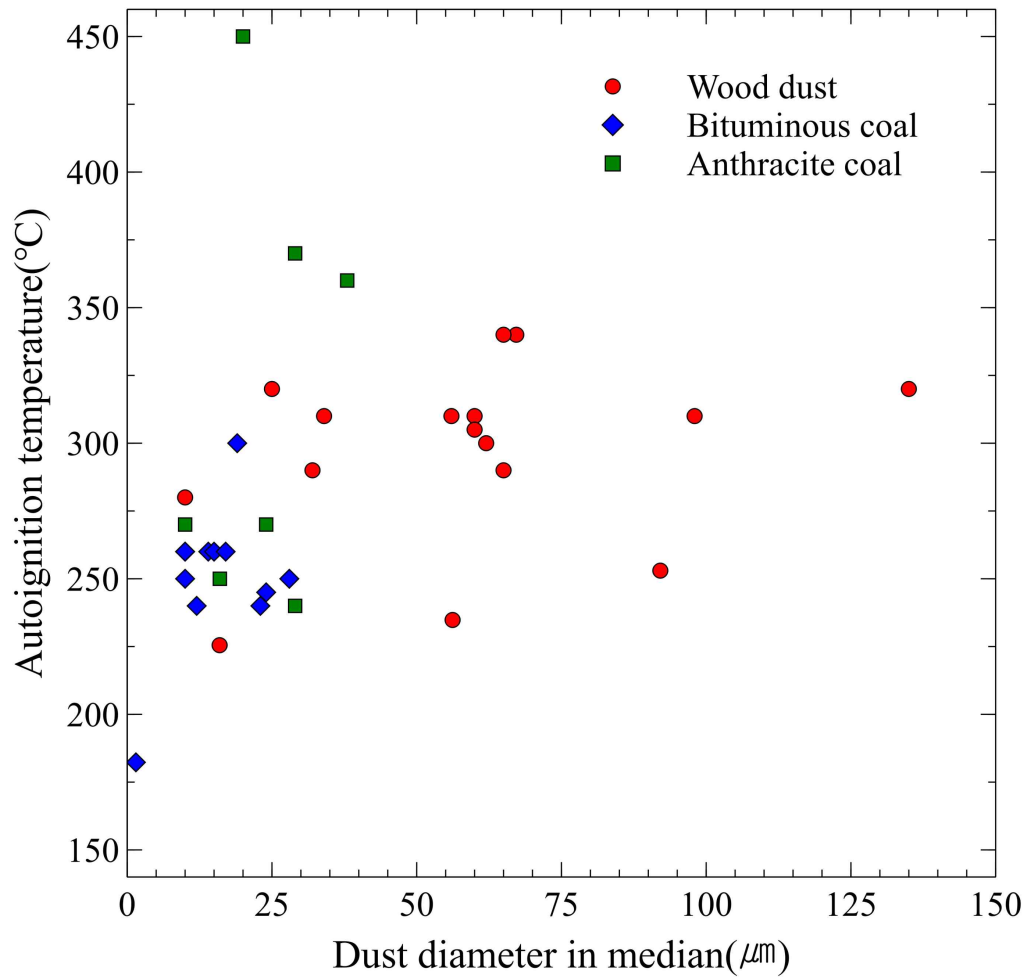
(4) 목재펠릿 분진의 열안정성

목재분진 16종, 무연탄 7종, 역청탄 12종의 자동발화점에 대한 문헌자료를 인용하여 [그림 VI-1]을 작성하였다. 앞서 제시한 목재펠릿 분진 시료A, 시료B, 시료C에 대한 d_{50} 기준 입도는 $0.620\ \mu\text{m}$, $1.389\ \mu\text{m}$, $314.1\ \mu\text{m}$ 이고, 자동발화온도는 각각 $236.33\ ^\circ\text{C}$, $230.67\ ^\circ\text{C}$, $276.33\ ^\circ\text{C}$ 로 측정되었으며, 추가 자료로 캐나다 목재펠릿 협회에서 2종 시료에 대해 측정한 결과 $220\ ^\circ\text{C}$, $215\ ^\circ\text{C}$ 로 측정된 점을 고려했을 때²⁰⁾, 목재펠릿 분진 또한 목재, 석탄 계열 분진과 유사한 수준인 것으로 판단하였다.

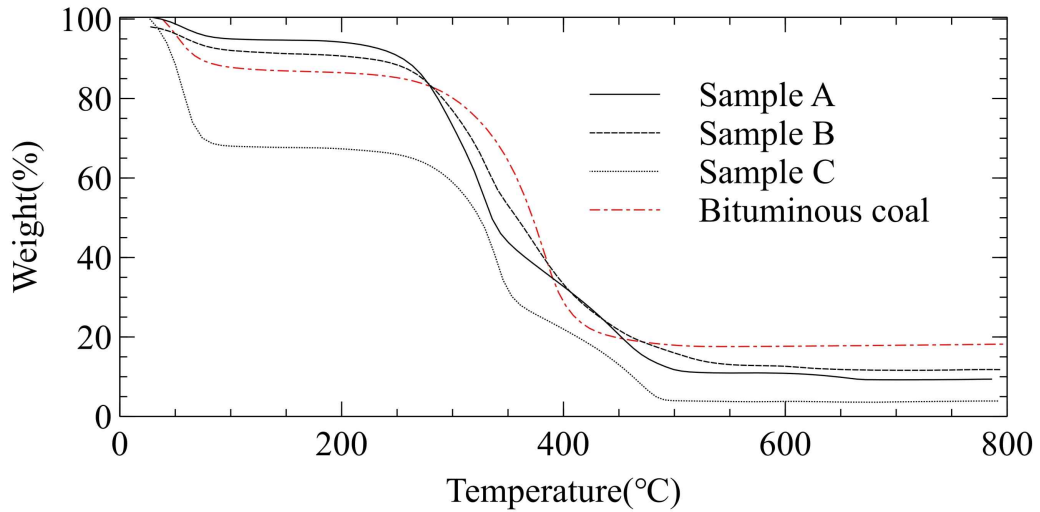
[그림 VI-4]는 이번 열중량 분석 결과와 2018년 아역청탄에 대해 실시한 열중량 분석 결과를 비교한 그래프이다. 그림 상에서 확인할 수 있듯이 목재펠릿분진의 열분해·산화로 인한 중량 감소 구간이 아역청탄과 유사한 수준으로 검토되었다. 목재펠릿의 경우에 2차 중량감소 구간이 시료A, 시료B, 시료C 각각 $193\ ^\circ\text{C}$, $191\ ^\circ\text{C}$, $194\ ^\circ\text{C}$ 에서 시작하여 $508\ ^\circ\text{C}$, $567\ ^\circ\text{C}$, $501\ ^\circ\text{C}$ 에서 종료된 것으로 측정되었으며, 아역청탄의 경우 $194\ ^\circ\text{C}$ 에서 시작하여 $526\ ^\circ\text{C}$ 에 종료한 것으로 측정되었다²¹⁾.

20) Melin, S.. Testing of explosibility and flammability of airborne dust from wood pellets. Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.

21) 한우섭, 이정석, 서동현, 최이락, 오수현, 박효진, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 아역청탄의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2018.



[그림 VI-9] 자동발화점 문헌자료 비교 결과



[그림 VI-10] 역청탄과 열중량 분석 결과 비교

(5) 목재펠릿의 자연발화 메커니즘

목재펠릿이나 목재계열 분진 저장 과정에서의 자연발화 현상은 다수의 사고로 보고되어 왔으며, 실제로 발생하는 자연 현상이다. 하지만 추론만 할 뿐이지 특정 조건에서 자연발화가 발생한다고 명확하게 설명 가능한 것은 아니다. 현재까지 학계에서 보편적으로 인식하고 있는 내용은, 상온에서 약 45 °C 구간까지는 중온성 미생물 대사로 인해 1차 가열되고, 약 45 °C부터는 호열성 미생물이 발열 요인으로 작용해서 약 80 °C까지 가열된다. 이후부터는 자동발화가 가능한 120 °C도 수준까지는 화학적 산화로 가열이 되는 것으로 추정하고 있다²²⁾²³⁾.

22) 마사요시 키모토, 마사미 아시자와, “목재펠릿 저장시의 자연발화성에 관한 조사 - 자연발화 메커니즘과 실증 시험법-”, 일본 전력중앙연구소 조사보고서 M08022, 2009

(木本 政義, 芦澤 正美, “木質ペレット貯蔵時の自然発火性に関する調査 -自然発火メカニズムと実証試験法-”, 電力中央研究所 調査報告 M08022, 2009)

23) Riggle, D., “Controlling and preventing fires at compost facilities”. 58-96,

이런 가설이 납득하기 어려운 점은 미생물 대사는 일정 수준 이상의 습도 조건을 충족되어야 하는 반면, 화학적 산화는 건조할수록 유리하다는 점이다. 다시 말해서 목재펠릿 더미가 수분에 노출되었다고 할 때, 그 위에 다시 먼지 등으로 인해서 불침투성 층이 형성되어 수분이 보존되면서 미생물 대사가 원활하게 발생하다가, 어떤 이유로 불침투성 층이 제거되면서 약 80 ℃ 수준까지 가열된 목재펠릿에 산소 공급이 원활해지면서 수분이 소실되면서 화학적 산화를 시작한다는 것이 현재 보고되고 있는 내용이다. 특히 이런 과정이 발생하기 어려운 이유가 수분 소실 과정이다. 수분 소실 과정에서는 온도 저하 없이 수분이 소실되어야 한다. 결과적으로 온도 상승 각각의 단계별로는 실험을 통해 확인된 사례가 많이 있으나, 일련의 과정 전체가 재현된 실험은 확인할 수 없었다.

하지만 분명한 점은 국내에서도 재해사례가 있듯이 목재펠릿 저장 과정에서 자연발화가 발생하고 있다는 점이다. 물론 질식·중독, 가스폭발, 자연발화로 인한 사고는 주로 미국, 캐나다, 북유럽 지역에서 주로 보고되어 왔다. 한국이나 일본의 경우 주로 베트남에서 목재펠릿을 수입하는 양이 많아서, 항해 기간이 10일 내외로 상대적으로 짧고, 저장설비 확보를 위한 용지 마련이 쉽지 않아 대체적으로 재고량을 3개월 이내로 관리할 수밖에 없는 여건인 것이 ‘질식·중독, 가스폭발, 자연발화로 인한 사고’ 예방에 도움이 되었을 가능성도 있는 것으로 추정된다.

하지만 언제든지 예외적인 상황은 발생할 수 있으며, 오히려 사고사례가 많지 않아서 위험 요인으로 인식하는 부분에 있어서는 취약하다고 볼 수도 있다. 따라서 무엇보다 우선 목재펠릿 저장설비는 필히 밀폐공간프로그램을 수립·시행해야 한다. 실험 결과에 따르면 이산화탄소 뿐만 아니라 일산화탄소, VOC까지 발생하는 것이 입증되었으므로, 질식·중독 뿐만 아니라 중독 사고 예방을 위한 조치도 필요하며, 상시 가스 발생 상황을 모니터링 할 필요가 있다.

추가로 목재펠릿이 아니라 목재칩이라면 가스발생 위험이 더욱 높다고 할 수 있으므로 참고할 필요가 있으며, 자연발화에 대비해서는 목재펠릿 재고 공간을 적정수준으로 조정하는 자체 기준을 마련해야 한다. 마지막으로 소화 방법이다. 자연발화로 화재가 발생하는 경우 훈소 형태로 진행되는 사례가 많다. 사이로와 같은 밀폐공간 내부에서 훈소가 발생하는 경우 질소를 이용한 질식소화를 해야한다. 그러기 위해서는 사이로 설계 단계에서부터 질식소화를 위한 전용 노즐을 준비해야하며, 질식소화 계획을 수립하고 관련 훈련을 실시해야 한다. 무리한 질식소화는 오히려 분진운을 만들어 분진폭발로 사고로 이어질 수도 있는 문제이다.

3. 마찰로 인한 화재 위험성

[그림 VI-11]은 분진의 마찰감도를 측정하는 시험 장비로 독일연방재료시험연구소에서 제안한 방식으로 BAM마찰감도 시험기라고 한다. 무게추를 조정하면서 수직하중을 달리하면서 입자간에 작용하는 마찰력을 조정하는 방법으로 마찰감도를 등급으로 표기하는 방식이다. 시험 과정에서 실제로 분진에 작용하는 마찰력은 입도 분포, 입자의 형상 등에 따라서 달라지게 되므로 마찰력으로 표기하는 것이 아니라, 마찰감도라고 표기하게 된다.

이런 형태의 마찰감도를 확인하기 위해서는 결국 수직하중이 각 입자 간의 마찰력으로 전달되어야 하는데, 목재펠릿 분진뿐만 아니라 목재계열 분진은 조성이 대부분 셀룰로오스로 구성되어 있어서, 하중이 마찰력으로 작용하기 전에 흡수되어 버린다. 다시 말해서 일정 수준 이상의 경도가 있어야만 마찰력으로 분진을 점화시킬 수 있다는 의미이다.



[그림 VI-11] BAM 마찰감도 시험 장비

물론 단순한 접근으로 보우드릴(Bowdrill)로 목재에 불을 붙이는 것을 생각해 볼 수 있다. 하지만 이는 어디까지나 목재의 한 부위에 지속적인 마찰을 일으키는 방식이다. 이런 원리에 따르면 목재펠릿이나 그 분진이 동력계통 기계에 고착되어 장시간 동안 변형 없이 마찰력을 받아야만 화재로 이어질 수 있다는 의미이다. 사실 목재펠릿을 취급하는 과정에서 이런 상황이 결코 발생할 수 없다고 단정적으로 말할 수 있는 것은 아니지만, 화재 사고의 원인으로 거론될 만큼의 요인이라고 보기에는 힘들다고 본다.

이런 의미에서 앞서 소개한 사고사례 중 일본에서 발생한 총 3건의 마찰 화재에 대해서 상세한 내용을 확인할 수는 없으나, 컨베이어에서 발생한 고장으로 인해서 마찰 및 가열된 표면에 분진이 노출되면서 발생한 화재라고 추정되어 진다. 2024년 1월 일본 아이치현 목재펠릿 혼소 발전소 분진폭발 관련해서 자체적으로 조사한 사고조사 보고서에서는 이런 마찰로 인해 발생하는 설비 가열 문제에 대해서 상세히 다루고 있다²⁴⁾.

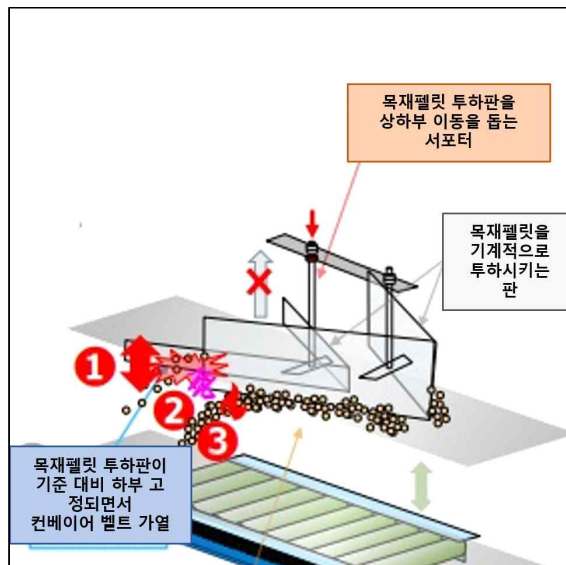
[그림 VI-1]은 컨베이어로 이송되는 목재펠릿을 투하용 판을 이용하여 기계적으로 보일러 투입 직전 임시 저장소인 병커로 투입하는 장치를 모사한 것이다. 여기는 투하용 판이 컨베이어 벨트에 작용하는 하중을 최소화하기 위해 상하부로 이동을 돕는 서포터가 있는데, 이게 기준치 보다 약 2 cm 낮게 고정되면서 컨베이어에 하중을 가했다고 보고되었다.

사고 발전소 자체적으로 모형 컨베이어 시험 장비를 이용하여 유사한 상황에 대해서 실험한 결과 10분 이내에 300 °C 이상으로 가열될 수 있다는 것을 입증하였다. 물론 가연성 분진을 취급하는 만큼 분진 방폭 온도 기준에 적합한 설비로 공정이 구성될 것이고, 이와 더불어 마찰로 인한 위험 요인은 사전에 검토될 수 있으므로, 점화원으로 작용할 수 있는 요소들은 사전에 제거될

24) 주식회사 JERA, 타케토요 화력발전소의 화재 사고에 대해, 지역 주민 설명자료, 2024.05.25. (株式会社JERA, 武豊火力発電所における火災事故について, 地域の皆さまへのご説明資料)

수 있다고 본다.

하지만 아이치현 사고와 같이 순간적인 컨베이어 고장을 사전에 인지하고 예방하는 것은 굉장히 어려운 일이라고 할 수 있다. 따라서 목재펠릿 취급 현장에서는 항상 이런 기술적인 한계점을 인식하고 있어야 한다. 컨베이어 고장으로 화재가 발생한 경우 어떻게 감지하고 소화하는 방법을 어떤 방식으로 할 것인지, 분진폭발이 발생하고 폭연 제어에 실패한 경우 어떻게 대피할 것인지 분명한 대응 절차와 이에 따른 훈련이 필요하다고 할 수 있다.



[그림 VI-12] 아이치현 화력발전소 분진폭발 사고 모사 그림

VII. 결론



VII. 결론

21세기 들어 우리 주변에는 여러 가지 큰 변화가 있었다. 흔히 전파 체계나 전자 장치의 발전을 우선 상기하게 되지만, 사실 산업계에 있어서의 가장 큰 변화라고 한다면, 유엔기후변화협약('92), 교토의정서('97), 파리협정('15)에 따른 신·재생에너지의 도입이다. 2010년부터 신·재생에너지 관련 연구 논문 수 또한 매년 약 20%씩 성장하고 있는 상황이며¹⁾, 이미 산업계에서는 신·재생에너지 관련 설비들이 자리 잡기 시작했다.

사실 이런 신·재생에너지라고 해서 굉장히 특별한 물질을 취급하는 것은 아니다. 수소, 암모니아 등, 이미 그 유해·위험성이 다수 연구된 물질 대부분이다. 하지만, 이런 물질들을 취급하는 방법, 취급량 자체가 과거와는 비교할 수 있는 수준이 아니다. 이런 의미에서 석탄 화력발전의 대체 연료로 주로 사용되고 있는 목재펠릿 분진의 위험성에 대해서 검토가 필요하다는 판단하에 위험성 평가를 실시하였다.

물론 이런 목재펠릿 시장에 대한 회의적인 시각도 있는 것이 사실이지만, 이미 우리나라는 세계 3위 수준의 목재펠릿 사용국이다. 여기에 더해 연료 전량을 목재펠릿으로 사용하는 전소 발전소 또한 추가로 건설 중이다. 이런 의미에서 목재펠릿 분진의 위험성 검토는 반드시 필요한 부분이라고 본다.

사실 목재펠릿은 국내에서 산업용으로 주로 활용되고 있으나, 미국, 캐나다, 북유럽과 같이 목재 자원이 풍부한 국가에서는 21세기 이전에도 많이 사용해 왔다. 그 결과 목재펠릿 제조, 운반, 취급, 저장 과정에서 발생한 다양한 화재·폭발 사고사례를 확보할 수 있었다. 이런 사고를 집계한 결과 목재펠릿은 분진폭발, 자연발화, 마찰화재, 질식·중독, 가스폭발 등의 위험이

1) Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Al-Musawi, T. J., Al-Jiboory, A. K., Salman, H. M., ... & Jaszczur, M.. A comprehensive review of international renewable energy growth. Energy and built environment, 2024.

있는 것으로 확인되었다.

따라서 목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성을 평가하고자, 목재펠릿 제조소와 목재펠릿 전소 발전소에서 시료를 확보하여, 입도분석, 분진폭발, 발화 특성에 대해서 시험을 실시하고, 목재 분진, 무연탄 분진, 유연탄 분진과 비교로 위험성을 검토하였다.

분진폭발 위험성에 있어서는 입도가 작은 목재펠릿 분진이라고 기존의 목재 분진과 큰 차이점을 확인할 수 있는 것은 아니었다. 다만, 겉보기 밀도가 목재 분진이나, 특히 석탄 계열 분진 보다 월등히 작은 것으로 확인되었으므로 분진운 자체가 상대적으로 쉽게 형성될 위험이 있다. 따라서 분진운을 제어하는데 있어서 석탄 계열 분진보다 높은 관심이 필요하다.

더군다나 분진운의 최소 점화 온도 비교 결과에서 목재 계열 분진이 대체적으로 석탄 계열 분진보다 낮은 것으로 검토되었다. 그러므로 분진폭발 점화원 제어 차원에서 분진운이 노출될 수 있는 고온 표면을 관리해야 한다. 또한 석탄 계열 분진보다 최소 점화 온도가 낮다는 점을 염두에 두고 관련 설비를 구성해야 한다.

추가로 폭발압력상승속도가 석탄 계열 분진과 비교했을 때, 목재 계열 분진이 빠른 것으로 확인되었다. 따라서 폭연으로 인한 압력 해소 방안을 확보하는데 있어서 석탄 계열 분진에서 취급하던 설비를 그대로 적용해서는 안되며, 목재펠릿을 취급 위한 새로운 공정 설계가 필요하다.

자연발화 현상에 대해서 직접 시험을 실시한 것은 아니지만, 그간 문헌상으로 연구된 내용에 따르면, 목재펠릿뿐만 아니라 목재 계열 분진의 경우 유산소 호흡, 미생물 대사, 화학적 산화 과정에서 이산화탄소, 일산화탄소, VOC가 발생하는 것으로 확인되었다. 그리고 이런 호흡, 대사, 산화 현상이 온도 상승 단계별로 연이어 발생하면서 화재 사고가 발생한다는 것이 현재 학계의 보편적인 의견이었다.

사실 메커니즘 상으로 화재 사고가 쉽게 발생할 수 있다고 단정적으로 설명할 수는 없다고 본다. 하지만 목재펠릿 제조소나 발전소의 경우 취급량

자체가 크기 때문에 충분히 질식·중독 사고를 초래할 수 있는 수준이고, 목재펠릿의 저장 방법, 저장 환경, 저장 기간 등은 공장 운영 상황에 따라서 언제든지 변경될 수 있다. 따라서 질식·중독 사고 예방과 더불어 자연발화로 인한 화재 사고 예방 조치 또한 필요하다고 본다.

이런 의미에서 저장설비의 경우 기본적으로 밀폐공간프로그램 운영, 가스 발생에 따른 가스·산소농도 측정, 환기설비 확보, 저장 기간 관리 프로그램 운영과 더불어 훈소 발생에 따른 질식소화 설비와 훈련 또한 필요한 것으로 판단하였다.

마지막으로 마찰화재의 경우 직접적인 목재의 마찰 보다는, 주로 기계적인 마찰에 의해서 가열된 표면에 목재펠릿 분진운이나 목재펠릿이 직접 노출되면서 발생하는 것으로 판단되었다. 따라서 정기적인 동력계통 설비의 점검과 더불어 화재 상황에 대응할 수 있는 대책이 필요하다고 본다.

참고문헌

(사)한국에너지융합협회, “한국의RE100협의체 RE100정보플랫폼”,
k-re100.or.kr/bbs /board.php?bo_table=sub2_2_2 (2025.05.19.)

k-re100.or.kr/doc /sub1_1_1.php (2025.05.19.)

경제산업성 산업보안그룹 전력안전과, “바이오매스 발전과 관련한 화재·폭발 사고 및 그 대응에 관련하여”, 2024 (經濟産業省 産業保安グループ 電力安全課, “バイオマス発電所における爆発・火災事故及びその対応について”, 2024).

기업 재생에너지 이니셔티브, 플랜1.5, “2030 국내 재생에너지 수요 전망 보고서”, 2023.

마사요시 키모토, 마사미 아시자와, “목재펠릿 저장시의 자연발화성에 관한 조사 –자연발화 메커니즘과 실증 시험법-”, 일본 전력중앙연구소 조사보고서 M08022, 2009 (木本 政義, 芦澤 正美, “木質ペレット貯蔵時の自然発火性に関する調査 -自然発火メカニズムと実証試験法-”, 電力中央研究所 調査報告 M08022, 2009).

안병준, 이수민, “목타르와 전분 첨가제 혼합에 따른 목재펠릿 품질특성 평가”, 한국목재공학회지 vol. 42 no. 3 pp 318-326, 2014.

이근원, 이수희, 한우섭, 한인수, 이정석, 최이락, “화학사고 예방 및 원인구명을 위한 목재분진의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2013.

주식회사 JERA, 타케토요 화력발전소의 화재 사고에 대해, 지역 주민 설명자료, 2024.05.25. (株式会社JERA, 武豊火力発電所における火災事故について, 地域の皆さまへのご説明資料)

한국수자원공사. (2023). 상수도 관망 해석을 위한 수온별 물성 자료집 (K-water-2023-01). 한국수자원공사.

한국에너지공단 통계분석실, “2023년 신재생에너지 보급통계 결과 안내”, 2023.

한우섭, 이정석, 서동현, 최이락, 오수현, 박효진, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 아역청탄의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2018.

Abelha, Pedro, Cieplik, Mariusz K., “Evaluation of steam-exploded wood pellets storage and handling safety in a coal-designed power plant”, *Energy & Fuels*, 35.3 pp 2357-2367, 2021.

ASTM E659-24, “Standard Test Method for Autoignition Temperature of Chemicals”, 2024.

Bergman, O.; Nilsson, T. “Outside storage of Birch chips at Morrum's sulphate mill”, Rapport, Institutionen för Virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet no. 60. p. 104, 1968.

Chen, C., & Hu, L.. “Nanoscale ion regulation in wood-based structures and their device applications”. *Advanced Materials*, 33(28), 2002890, 2021.

Collazo, J., Pazó, J. A., Granada, E., Saavedra, Á., & Eguía, P. (2012). Determination of the specific heat of biomass materials and the combustion energy of coke by DSC analysis. *Energy*, 45(1), 746-752.

CSB, “Dust incidents 2016-2017”, U.S. Chemical safety and hazard investigation board, 2018.

Dust safety science, “2021 Combustible incident report”, 2022.

Emhofer, Waltraud. “Emissions from wood pellets during storage”. Diss. Technische Universität Wien, 2015.

Graham, S., Eastwick, C., Snape, C., & Quick, W., “Mechanical degradation of biomass wood pellets during long term stockpile storage”. Fuel Processing Technology, 160, 143-151, 2017.

Janes, A., Chaineaux, J., Carson, D., & Le Lore, P. A., “MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: Comparison of measured minimum ignition energy (MIE)”. Journal of hazardous materials, 152(1), 32-39, 2008.

Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Al-Musawi, T. J., Al-Jiboory, A. K., Salman, H. M., ... & Jaszczur, M.. A comprehensive review of international renewable energy growth. Energy and built environment, 2024.

Horváth, J., Balog, K., & Scarafilo, D., “Hazards of Explosibility Dust from Wood Pellets”. Advanced materials research, 1001, 324-329, 2014.

Keshavarz, A., Akhondzadeh, H., Sayyafzadeh, M., & Zagar, M.. “Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs”, Gulf Professional Publishing, pp 233-268, 2018.

Krigstin, S., Wetzell, S., Jayabala, N., Helmeeste, C., Madrali, S., Agnew, J., & Volpe, S., "Recent health and safety incident trends related to the storage of woody biomass: A need for improved monitoring strategies". *Forests*, 9(9), 538, 2018.

Kuang, Xingya, et al. "Rate and peak concentrations of off-gas emissions in stored wood pellets—sensitivities to temperature, relative humidity, and headspace volume." *Annals of Occupational Hygiene* 53.8, 789-796, 2009.

Kubler, H. A. N. S. "Heat generating processes as cause of spontaneous ignition in forest products", 301-327, 1987.

Magalhães, Duarte, et al. "Prediction of yields and composition of char from fast pyrolysis of commercial lignocellulosic materials, organosolv fractionated and torrefied olive stones". *Fuel* 289 (2021): 119862, 2021.

Melin, S.. "Testing of explosibility and flammability of airborne dust from wood pellets". Special Report Prepared for Wood Pellet Association of Canada, 2008.

Moreno, V. C., & Cozzani, V. "Major accident hazard in bioenergy production". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 135-144, 2015.

NFPA 921, "Guide for Fire and Explosion Investigations", 2024.

Riggle, D., "Controlling and preventing fires at compost facilities". 58-96, 1996.

Rupar-Gadd, Katarina. "Biomass pre-treatment for the

production of sustainable energy: emissions and self-ignition". Diss. Växjö University Press, 2006.

Soto-Garcia, L., Ashley, W. J., Bregg, S., Walier, D., LeBouf, R., Hopke, P. K., & Rossner, A., "VOCs emissions from multiple wood pellet types and concentrations in indoor air". *Energy & Fuels*, 29(10), 6485-6493, 2015.

Springer, E.L., Hajny, G.J., Feist, W. C., "Spontaneous heating in piled wood chips", *Tappi* 53(1)85-86, 1969.

Thörnqvist, T., "Storage of disintegrated logging residues", Rapport, Institutionen för Virkeslära, Sverges Lantbruksuniversitet no. 133. p. 62, 1983.

Walker, Ian K. "The role of water in spontaneous combustion of solids." *Fire research abstracts and reviews*. Vol. 9. No. 1. 1967.

Wzorek, M., Król, A., Junga, R., Małecka, J., Yilmaz, E., & Kolasa-Więcek, A. "Effect of storage conditions on lignocellulose biofuels properties". *Scientific Reports*, 14(1), 15192, 2024.

부록. 목재·석탄계열 분진의 물리적 특성에 대한 문헌조사 결과

심벌(Symbol)

- d_{50} 도수분포 50%에서 입도(Median diameter)
- P_{max} 최대폭발압력
- K_{st} 폭연지수(분진폭발지수)
- MEC 폭발하한농도(Minimum explosion concentration)
- MIE 최소점화에너지(Minimum ignition energy)
- MIT 분진운 최소 점화 온도(Minimum ignition temperature)
- Glowing temperature 자동발화온도

참고문헌

(KOSHA) 이근원, 이수희, 한우섭, 한인수, 이정석, 최이락, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 목재분진의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2013.

한우섭, 이정석, 서동현, 최이락, 오수현, 박효진, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 아역청탄의 화재·폭발 위험성평가 보고서”, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2018.

(윤여송) 박재영, 문진영, & 윤여송. 유연탄 분진특성분석을 통한 폭발 위험성 평가. 화학공학, 62(4), 327-334, 2024.

(Gestis) 독일 사회손해보험원의 산업안전보건연구원(IFA, Institute for occupational safety and health of German social accident insurance) 분진폭발 데이터베이스(Gestis-dust-ex)

구분	출처		d ₅₀ (μ m)	P _{max} (bar)	K _{st} (bar · m/s)	MEC (g/m ³)	MIE (mJ)	BAM MIT(°C)	G-G MIT(°C)	Glowing Temperature(°C)
	참고문헌	시료구분								
Wood dust	KOSHA	siló	56.2	8.3	92.6	60	10/30			234.8
Wood dust	KOSHA	milled	15.96	8.7	138.1	60	10/30			225.5
Wood dust	KOSHA	뉴송	92.08	8.3	112	50	30/100			253
Wood dust	Gestis	5154	10	6.1	70		1000	550		
Wood dust	Gestis	1248	10	8.6	113	125	1000	330	460	280
Wood dust	Gestis	4352	27							
Wood dust	Gestis	2005	60	8.1	57				500	310
Wood dust	Gestis	2006	62	9	100				510	300
Wood dust	Gestis	7	400						560	330
Wood dust	Gestis	2007	56				10/30		480	310
Wood dust	Gestis	2003	21				30/100			
Wood dust	Gestis	2004	33				30/100			
Wood dust	Gestis	6151	25	8.7	169	30	10/30	410		320
Wood dust	Gestis	6152	34	8.3	129		30/100	420		310
Wood dust	Gestis	6153	250	7.6	40	250				
Wood dust	Gestis	6232	63	8	87	60				
Wood dust	Gestis	10135	36.8	8.6	148	30	10/30	420		
Wood dust	Gestis	10135	67.2							340
Wood dust	Gestis	7606	135				300/1000	420		320
Wood dust	Gestis	3396	63	8.9	118	30		430		
Wood dust	Gestis	26	98	8.6	132				410	310
Wood dust	Gestis	17	60	9.2	142				470	305
Wood dust	Gestis	18	62	10.5	192					
Wood dust	Gestis	19	62	9	86					
Wood dust	Gestis	20	65	7.7	83	60			490	340
Wood dust	Gestis	2008	32	8.6	86				500	290
Wood dust	Gestis	2009	65	9	95				470	290
Wood dust	Gestis	5636	32				10/30	410		
Wood dust	Gestis	10525	83	7.4	63	20	30/100	410	330	
Wood dust	Gestis	10523	145	6.7	36	20	300/1000	430	330	

구분	출처		d ₅₀ (μm)	P _{max} (bar)	K _{st} (bar · m/s)	MEC (g/m ³)	MIE (mJ)	BAM MIT(°C)	G-G MIT(°C)	Glowing Temperature(°C)
	참고문헌	시료구분								
Bituminous coal	KOSHA	아역청탄	1.5	6.43	96.5	25	3/10			182.3
Bituminous coal	Gestis	260	28	8.8	114	15		600		250
Bituminous coal	Gestis	2196	10	8.6	112			460		250
Bituminous coal	Gestis	264	19	8.6	43	60		670		300
Bituminous coal	Gestis	2193	10	9.1	58	60		500		260
Bituminous coal	Gestis	2199	23	9.1	70			580		240
Bituminous coal	Gestis	2193	10	9.1	59			510		260
Bituminous coal	Gestis	261	14	8.8	72			590		260
Bituminous coal	Gestis	262	15	9	71			590		260
Bituminous coal	Gestis	263	17	9.3	93	60		550		260
Bituminous coal	Gestis	2197	12	9	95	60		570		240
Bituminous coal	Gestis	259	24	9.2	129	60		590		245
Bituminous coal	Gestis	2410	260	7.6	63	30		500		
Bituminous coal	윤여송	A	35	7.1	99	350		532		
Bituminous coal	윤여송	B	52	5.1	38			634		
Anthracite coal	Gestis	3508	10	6.4	85	60	1000			
Anthracite coal	Gestis	3509	10	6.5	80	60	1000			
Anthracite coal	Gestis	2970	29				1000			
Anthracite coal	Gestis	10359	9.8	6	29	125				
Anthracite coal	Gestis	2176	16	8.1	70			600		250
Anthracite coal	Gestis	2177	24	8.4	80			610		270
Anthracite coal	Gestis	2174	10	9	55			590		270
Anthracite coal	Gestis	2181	38	8.6	86	125		610		360
Anthracite coal	Gestis	2198	29	8.3	70	60		610		240
Anthracite coal	Gestis	6027	29	8.4	123		30/100	530		370
Anthracite coal	Gestis	2186	20	0.6	2					450

연구진

평가기관 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실

평가책임자 : 정기혁 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 서동현 (부장, 위험성시험부)

연구원 : 최이락 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 고윤현 (차장, 위험성시험부)

연구원 : 김천동 (차장, 위험성시험부)

연구기간

2025. 05. 19. ~ 2025. 08. 08.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식 견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

목재펠릿 분진의
화재·폭발 위험성 평가
(2025-산업안전보건연구원-548)

발행일 : 2025년 12월

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 박승현

연구책임자 : 산업안전연구실 위험성시험부 정기혁 연구위원

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전화 : 042-869-0333

팩스 : 042-863-9003

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체