

연구보고서

# 폐수 증발농축공정의 화재폭발 위험성 및 안전관리 방안

최이락·서동현·정기혁·이한희·김천동

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





# 요약문

- 연구기간 2023년 07월 ~ 2023년 11월
- 핵심단어 폐수, 폐수수탁업, 증발농축, 증발건조, 화재폭발
- 연구과제명 폐수 증발농축공정의 화재폭발 위험성 및 안전관리 방안

## 1. 연구배경

폐수처리공법 중 하나인 증발농축공정은 폐수를 증발농축장치에 유입하여 증발 및 농축한 후, 증발된 증기는 응축과정을 거쳐 처리수로 배출하고 농축액은 증발건조기로 이송되어 건조과정을 거쳐 최종 처리되는 공법으로 운전비용이 적게 소요되면서 처리 효율이 높아 다양한 분야에서 많이 이용되고 있다. 증발농축공정의 주요 취급물질이 물이기 때문에 화학물질을 취급하는 다른 제조공정에 비해 상대적으로 안전하다고 인식되고 있으나, 감압조건에서 진공이 깨지거나 온도조절에 실패할 경우 내부온도가 증가하면서 슬러지가 과건조되어 산화 및 분해 등에 의해 화재폭발사고가 발생할 수 있으며, 폐수 특성상 모든 성분을 특정하는 것이 불가능하기 때문에 사고의 정확한 원인을 파악하기 어렵다. 2020년과 2023년, 각기 다른 폐수수탁업 사업장에서 화재사고가 발생했으며, 두 사고 모두 증발농축(건조)기의 온도가 상승함에 따라 슬러지가 과건조되어 분출되면서 화재가 발생한 것으로 보고되었다. 수탁폐수업의 경우, 폐수의 성상에 따른 유연한 처리가 불가능함에 따라 유사사고를 방지하기 위해서는 폐수수탁업 사업장의 안전관리에 대한 근본적인 대책이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 사고의 예방을 위해 증발농축공정을 사용하는 폐수수탁업 사업장의 실태를 파악하고, 문헌조사, 관련 법규, 사고사례 분석 및 폐수의 증발농축 공정에서 생성되는 물질에 대한 화재폭발 위험성 평가를 통해 사고예방을 위한 안전관리 방안을 마련하고자 하였다.

## 2. 주요 연구내용

### 1) 폐수 증발농축공정의 현황

환경부에 등록된 폐수처리업 등록현황에 의하면 '23년 5월 기준 국내 85개의 사업장이 폐수를 수탁, 재이용하는 폐수처리업체로 등록되어 있으며 이 중 75개 사업장은 50인 미만의 소규모이며, 2015년 자료에 의하면 64개 사업장에서 증발농축공정을 이용하여 폐수를 처리하고 있다. 산업안전보건법 제19조(안전보건관리담당자)에 따라 폐수처리업의 경우 2019년부터 상시근로자 20명 이상 50명 미만인 사업장은 안전보건관리담당자를 1명 이상을 지정하도록 하고 있으나 57%(48개소)에 달하는 20인 미만인 사업장은 선임의무가 없어 안전보건 관리 측면에서 여전히 '사각지대'에 머물러 있다고 할 수 있다.

환경부는 폐수처리업의 안전관리기준을 강화하고자 2020년 물환경보전법 하위법령을 개정하였다. 등록제에서 허가제로 변경되면서 허가절차, 기술능력, 시설 및 장비 등의 허가기준을 마련했으며, 수탁받은 폐수를 다른 폐수와 혼합하여 처리하려는 경우 혼합확인을 통해 사전에 폐수 간 반응여부 등을 확인하도록 했다. 그러나 실제 운전 조건에서 반응위험성이나 과건조에 의한 분해 등에 의한 화재폭발 위험성을 사전에 예방하는 데 있어 혼합확인으로는 한계가 있는 것으로 판단된다.

폐수수탁업 5개 사업장을 방문하여 인터뷰를 진행하고, 공정 및 설비 관련 안전관리 현황을 파악하였다. 수탁폐수 간 혼합확인은 법적인 의무사항으로 항목별로 실시하고 있었으며, 압력계는 진공만 측정가능한 상태로 판체크밸브, 파열판 등의 설비는 있으나 안전밸브는 미설치되어 있었다. 또한 정상운전조건 이탈시 경보장치는 1곳을 제외하고 모두 설치되어 있었으며, 스팀 공급차단과 냉각수 공급의 연동은 미설치되었다. 안전운전절차서는 설비의 운전 및 유지보수 관련 설명의 위주로서 정상운전조건 이탈시의 절차에 대해서는 포함되지 않았다.

## 2) 폐수 처리업의 사업장의 사고사례

2013년부터 2023년 8월까지 폐수처리업으로 등록된 사업장의 재해사례를 수집하여 분석하였다. 수탁처리업 34개, 수탁·재이용업 18개, 재이용업 33개 업소가 등록되어 있으며 재해현황은 사망 16명, 부상 158명, 재해건수는 156건이다. 업종별로 구분한 재해자수는 수탁 및 수탁·재이용업 사업장의 재해자수가 전체 재해자수의 95.4%에 달하는 것으로 나타났다. 발생형태를 화재, 폭발, 이상 온도 및 화학물질 누출·접촉으로 한정하여 업종별로 구분한 결과 전체 54건 중 51건이 수탁 및 수탁·재이용업 사업장에서 발생하였다.

2020년과 2023년, 각기 다른 폐수수탁업 사업장에서 화재사고가 발생했으며, 두 사고 모두 증발농축(건조)기의 온도가 상승함에 따라 슬러지가 과건조되어 분출되면서 화재가 발생한 것으로 보고되었다.

## 3) 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가

증발건조기에서 폐수 슬러지가 과건조되면서 사고가 발생함에 따라 폐수 슬러지를 건조처리하여 열분석, 마찰감도 등의 시험을 통해 반응안정성 및 화재폭발 특성을 평가하였다. 열분석 결과, 이상반응에 의해 화재폭발 특성에 영향을 미칠 수 있는 발열개시온도의 범위는 시료마다 차이는 있으며 (143~171) °C의 범위 내에 있었으며, 일부 시료는 단열조건에서 125°C에 도달하면서 자기발열이 시작되었고 16시간 후 시료용기의 한계 압력인 200bar를 초과하여 용기가 파열되었다. 또한 마찰감도를 평가한 결과, 일정 수준 이상의 마찰에너지에 의해 분해 및 착화 가능성이 있는 것으로 나타났다.

## 4) 폐수 증발농축공정의 안전관리 방안

사고가 발생한 증발건조기는 폐수 농축액 내 성상이 확인되지 않는 물질에 의해 반응폭주 등 이상 화학반응이 일어날 수 있기 때문에 특수화학설비

안전조치(계측장치, 자동경보장치, 긴급차단장치 등의 설치)에 준하는 조치를 실시하는 것을 고려해야 한다. 또한 수탁폐수 간 혼합확인 시 증발건조기의 공정과 유사한 환경에서 반응 여부를 확인할 수 있는 분석방법 도입이 필요할 것으로 판단된다. 관리적 측면에서는 안전운전절차서 및 비상대응절차 보완 및 근로자 교육 실시 등을 제안하였다.

### 3. 연구 활용방안

- 사업장 교육 및 기술자료로 활용, 학술지 논문 발표

### 4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 최이락
  - ☎ 042) 869. 0334
  - E-mail : yirac@kosha.or.kr

# 목 차

<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구배경 및 목적 .....	3
2. 연구내용 .....	5
3. 연구방법 .....	5
4. 용어의 정의 .....	6
<b>II. 폐수 증발농축공정의 현황</b> .....	<b>7</b>
1. 폐수 배출 및 처리 현황 .....	9
2. 폐수 배출·처리 관련 법령 및 안전관리 현황 .....	18
3. 폐수처리방법 .....	33
4. 증발농축공정 .....	39

# 목 차

<b>Ⅲ. 폐수처리업 사업장의 사고사례</b> .....	<b>45</b>
1. 국내 폐수처리업 사업장의 사고사례 .....	47
2. 증발농축공정 사고사례 .....	52
<b>Ⅳ. 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가</b> ..	<b>61</b>
1. 폐수 슬러지의 특성 및 처리 .....	63
2. 평가대상 물질 .....	65
3. 평가 장비 .....	68
4. 평가 결과 .....	84
<b>Ⅴ. 폐수 증발농축공정의 안전관리방안</b> .....	<b>97</b>
1. 공정(설비) 관련 안전관리 방안 .....	99
2. 관리적 측면의 안전관리 방안 .....	102

<b>VI. 결 론</b> .....	<b>103</b>
1. 폐수 배출 및 처리 현황 .....	105
2. 폐수 배출·처리 관련 법령 및 안전관리 현황 .....	106
3. 폐수 처리업 사업장의 사고사례 .....	107
4. 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가 .....	107
5. 폐수 증발농축공정의 안전관리 방안 .....	108
6. 연구의 한계 및 향후 과제 .....	108
<b>참고문헌</b> .....	<b>111</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>113</b>

# 표 목차

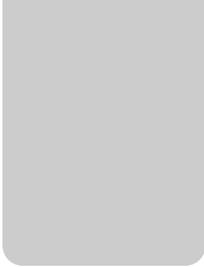
〈표 II-1〉 사업장의 규모별 구분 .....	10
〈표 II-2〉 종별 사업장수 및 폐수방류량(2021년 기준) .....	11
〈표 II-3〉 폐수처리 형태 구분(2021년 기준) .....	12
〈표 II-4〉 산업폐수 처리방법 .....	13
〈표 II-5〉 수질오염방지시설 .....	19
〈표 II-6〉 사업장별 환경기술인의 자격기준 .....	20
〈표 II-7〉 측정기기의 종류 및 부착대상 사업장 .....	20
〈표 II-8〉 폐수처리업의 허가요건 .....	22
〈표 II-9〉 폐수 간 반응여부 등의 확인방법 .....	25
〈표 II-10〉 폐수처리시설의 검사기준 .....	26
〈표 II-11〉 폐수수탁업 방문사업장 현황 .....	28
〈표 II-12〉 증발농축(건조)기 설비관리 실태 .....	30
〈표 II-13〉 안전보건관리체계 실태 .....	31
〈표 II-14〉 산업폐수 중의 주요 오염물질과 처리기술 .....	36
〈표 II-15〉 물리적 처리의 주요 시설 .....	36
〈표 II-16〉 화학적 처리의 주요 시설 .....	37
〈표 II-17〉 생물학적 처리의 주요 시설 .....	38
〈표 III-1〉 국내 폐수처리업 사업장 화재·폭발 사고 사례('13~'23년 8월) .....	50
〈표 III-2〉 증발농축공정 사고 2020년·2023년 비교 .....	60

〈표 IV-1〉 시료별 채취장소 .....	65
〈표 IV-2〉 시료별 수분 및 고형분 함량 .....	66
〈표 IV-3〉 평가대상 물질 목록 .....	66
〈표 IV-4〉 시료 사진 .....	67
〈표 IV-5〉 화재·폭발특성 평가항목 .....	68
〈표 IV-6〉 열분석 방법 .....	70
〈표 IV-7〉 DSC measuring cell 사양 .....	73
〈표 IV-8〉 TGA 사양 .....	75
〈표 IV-9〉 가속속도열량계(ARC) 실험조건 .....	77
〈표 IV-10〉 마찰감도 시험기 장비 구성 .....	78
〈표 IV-11〉 추와 하중(N)의 관계 .....	79
〈표 IV-12〉 마찰감도 폭발/불폭발 판정기준 .....	80
〈표 IV-13〉 마찰감도 등급표 .....	80
〈표 IV-14〉 분진폭발시험장비 사양 .....	82
〈표 IV-15〉 분진폭발시험에 적용된 규격 .....	83
〈표 IV-16〉 시료별 입도분석(부피기준) 결과 .....	85
〈표 IV-17〉 시료별 DSC 결과 요약 .....	87
〈표 IV-18〉 마찰감도시험 결과 .....	95
〈표 IV-19〉 시료별 금속원소 성분분석 결과 .....	96
〈표 V-1〉 화학설비 및 그 부속설비의 종류 .....	99
〈표 V-2〉 특수화학설비 관련 법령 .....	100

# 그림목차

[그림 II-1] 폐수배출시설 및 배출량 추이	9
[그림 II-2] 업종별 폐수 발생 및 방류량(2021년 기준)	11
[그림 II-3] 폐수처리 방법별 배출업소 및 폐수발생량 현황(2021년도)	14
[그림 II-4] 위탁처리 업소수 및 폐수발생량 추이	14
[그림 II-5] 전국 폐수처리업 등록 현황(2023년 5월 기준)	15
[그림 II-6] 전국 폐수처리업 근로자수 규모별 현황(2023년 5월 기준)	16
[그림 II-7] 폐수처리업의 폐수처리 과정	17
[그림 II-8] 물환경보전법에 의한 폐수배출시설 관리체계	19
[그림 II-9] 수탁폐수의 혼합확인 결과서(일부 발취)	27
[그림 II-10] 산업폐수의 무방류시스템 구성도	34
[그림 II-11] 폐수처리과정(Paola Foladori 등)	35
[그림 II-12] 3가지 타입의 증발기	40
[그림 II-13] 증발기 설치 예	42
[그림 II-14] 증발건조기 예	43
[그림 III-1] 폐수처리업 사업장의 재해자수 추이	47
[그림 III-2] 폐수처리업 사업장의 발생형태별 재해자수	48
[그림 III-3] 폐수처리업 사업장의 업종별 재해자수	49
[그림 III-4] 폐수처리업의 사업장의 발생형태별 재해자수(화학사고 한정)	49
[그림 III-5] 공정 흐름도	53
[그림 III-6] 사고당일 시간대별 경과	53

[그림 Ⅲ-7] 사고 후 현장 사진 .....	54
[그림 Ⅲ-8] 건조 1호기 취급물질의 열안정성 분석 결과 .....	55
[그림 Ⅲ-9] 공정 흐름도 .....	57
[그림 Ⅲ-10] 사고당일 시간대별 경과 .....	58
[그림 Ⅲ-11] 사고 후 현장 사진 .....	58
[그림 Ⅳ-1] 슬러지 수분의 분류 .....	63
[그림 Ⅳ-2] 입도분석기 .....	69
[그림 Ⅳ-3] D10, D50, D90의 입도분포 정의 .....	70
[그림 Ⅳ-4] DSC 측정 원리 .....	71
[그림 Ⅳ-5] DSC 열유속 예시 .....	72
[그림 Ⅳ-6] DSC 장비 .....	73
[그림 Ⅳ-7] TGA 장비 .....	75
[그림 Ⅳ-8] ARC 장비 .....	77
[그림 Ⅳ-9] 마찰감도시험기 .....	78
[그림 Ⅳ-10] 분진폭발시험장비(20-L Sphere Apparatus) .....	81
[그림 Ⅳ-11] 폭발 압력 시간 그래프 .....	82
[그림 Ⅳ-12] A-2, A-3 DSC 결과 .....	88
[그림 Ⅳ-13] B-2, B-3 DSC 결과 .....	88
[그림 Ⅳ-14] C-2, C-3 DSC 결과 .....	89
[그림 Ⅳ-15] D-2, D-3 DSC 결과 .....	89



## 그림목차

[그림 V-16] E-2, E-3 DSC 결과 .....	90
[그림 V-17] E-2의 공기 및 질소 DSC 결과 비교 .....	90
[그림 V-18] E-2의 TGA 결과 .....	91
[그림 V-19] A-2의 ARC 결과 .....	93
[그림 V-20] B-2의 ARC 결과 .....	93
[그림 V-21] D-2의 ARC 결과 .....	94

# I. 서론





# I. 서론

## 1. 연구배경 및 목적

폐수란 일상생활과 산업활동 과정에서 부산물로 배출되는 액체 형태의 폐기물로서 액상 또는 고상의 오염물질이 혼입되어 그대로 사용할 수 없는 물을 말하며 일상생활에서 발생하는 폐수를 생활하수<sup>1)</sup>(Sewage), 산업활동으로 발생하는 폐수를 산업폐수(Wastewater), 줄여서 ‘폐수’라 한다. 산업폐수는 주로 제품과 부품의 제조, 수리, 세척 등을 담당하는 제조업 시설에서 배출되며, 생활하수에 비하여 배출량이 상대적으로 적지만 오염물질의 농도가 높고 독성물질을 함유하여 오염부하량이 매우 크기 때문에 이에 대한 적절한 처리 및 관리가 필요하다(홍원석, 2015).

독성을 갖거나 고농도의 오염물질을 함유하는 폐수를 발생하는 사업장에서 수질오염방지시설을 별도로 설치하더라도 오염물질을 배출허용기준 이하로 처리하기에는 기술적으로 매우 어렵다. 이에 따라 오염물질을 높은 비용으로 처리하기 보다는 폐수 중에 순수한 물을 증발시켜 폐수 원액을 농축하는 기술들이 개발되고 있으나 다양한 폐수성분에 따른 장치의 불안정한 성능, 오염물을 지닌 응축수의 발생, 높은 비율의 농축 폐수 및 슬러지의 발생, 가스상 오염물질 배출 및 악취의 발생 등이 폐수 증발농축장치의 문제가 되고 있다(홍원석, 2015). 폐수처리공법 중 하나인 증발농축공정은 폐수를 증발농축장치에 유입하여 증발 및 농축한 후, 증발된 증기는 응축과정을 거쳐 처리수로 배출하고 농축액은 건조기로 이송되어 건조과정을 거쳐 최종 처리되는데 운전비용이 적게 소요되면서 처리 효율이 높아 다양한 분야에서 많이 이용되고 있다. 증발농축공정의 주요

1) 하수도법 제2조제1호 1. “하수”란 사람의 생활이나 경제활동으로 인하여 액체성 또는 고체성의 물질이 섞여 오염된 물질이 섞여 오염된 물(이하 “오수”라 한다)과 건물·도로 그 밖의 시설물의 부지로부터 하수도로 유입되는 빗물·지하수를 말한다.

취급물질이 물이기 때문에 화학물질을 취급하는 다른 제조공정에 비해 상대적으로 안전하다고 인식되고 있으나, 감압조건에서 진공이 깨지거나 온도조절에 실패할 경우 내부온도가 증가하면서 슬러지가 과건조되어 분해 및 분진폭발 등에 의해 화재폭발사고가 발생할 수 있으며, 폐수 특성상 모든 성분을 식별하고 정량 분석하는 것은 불가능하여 사고의 정확한 원인을 파악하는데 큰 장애요소가 된다.

폐수 발생량이 적어 수질오염방지시설을 설치하기에는 채산성이 낮거나 오염도가 높아 적정처리에 높은 운전비용이 소요되는 폐수를 발생시키는 사업장에서는 폐수를 위탁처리하게 된다. 이러한 사업장에서 배출되는 폐수의 적정 처리를 위해 폐수의 수탁처리를 위한 영업을 의미하는 폐수처리업<sup>2)</sup> 제도가 운영 중이며 '23년 5월 기준 국내 85개의 사업장이 폐수를 수탁, 재이용하는 폐수처리업체로 등록되어 있다. 이 중 75개 사업장은 50인 미만의 소규모이며, 64개 사업장<sup>3)</sup>에서 증발농축공정을 이용하여 폐수를 처리하고 있다. 수탁업은 특성상 다양한 사업장에서 배출된 폐수 내에 오염물질의 양, 구성성분 등의 변동성이 있으며, 저장조에 혼합하여 처리하는 경우가 많고, 중화 등의 전처리 공정에서 폐수 내 성분간 반응에 의해 다양한 화학물질이 생성될 수 있어 혼합처리로 인한 사고위험성이 매우 높다.

따라서 본 연구에서는 증발농축공정을 사용하는 폐수수탁업 사업장의 실태를 파악하고, 문헌조사, 관련 법규, 사고사례 분석 및 폐수의 증발농축공정에서 생성되는 물질에 대한 화재폭발 위험성 평가를 통해 사고예방을 위한 안전관리 방안을 마련하고자 하였다.

2) 물환경보전법 제6장 폐수처리업

3) 환경부 폐수처리업 등록현황(2015년)

## 2. 연구내용

본 연구과제의 수행내용 및 범위는 다음과 같다.

- 폐수 증발농축공정 관련 국내 현황
- 폐수 증발농축공정 관련 법령 및 문헌 고찰
- 폐수 증발농축공정 사업장, 공정 및 설비 등에 대한 실태 조사
- 폐수 증발농축공정 관련 사고사례 조사
- 폐수 증발농축공정 생성물질에 대한 화재·폭발 특성 평가
- 폐수 증발농축공정의 사고예방을 위한 안전관리 방안

## 3. 연구방법

본 연구과제의 주제별 연구방법은 다음과 같다.

- 폐수 증발농축공정 관련 선행연구 및 문헌 고찰
  - 국내외 증발농축공정 관련 선행연구
  - 관련 법규/기준 등 규제 현황
- 폐수 증발농축공정 사업장, 공정 및 설비 등에 대한 실태 조사
  - 사고발생 사업장을 포함한 증발농축공정 사용 사업장(5개소 내외) 방문 실태 조사
  - 사업장 관계자 및 공단 조사자 의견 수렴
- 폐수 증발농축공정 관련 사고사례 조사
  - 공단 재해조사의견서 및 통계자료 검토
- 폐수 증발농축공정 생성물질에 대한 화재·폭발 특성 평가
  - 열분석, 마찰감도, 분진폭발시험 등 시험 실시

## 4. 용어의 정의

본 보고서에서에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

- (가) “폐수”란 물에 액체성 또는 고체성의 수질오염물질이 섞여 있어 그대로는 사용할 수 없는 물을 말한다.
- (나) “수질오염물질”이란 수질오염의 요인이 되는 물질로서 구리와 그 화합물, 납과 그 화합물 등 환경부령<sup>4)</sup>으로 정하는 61개 물질<sup>4)</sup>을 말한다.
- (다) “수질오염방지시설”이란 점오염원, 비점오염원 및 기타수질오염원으로 부터 배출되는 수질오염물질을 제거하거나 감소하게 하는 시설로서 환경부령<sup>5)</sup>으로 정하는 것을 말한다.
- (라) “폐수배출시설”이란 수질오염물질을 배출하는 시설물, 기계, 기구, 그 밖의 물체로서 환경부령<sup>6)</sup>으로 정하는 것을 말한다.
- (마) “폐수배출량”이란 생산 활동으로 인하여 폐수배출시설에서 배출되는 폐수량을 말한다.
- (바) “공공폐수처리시설”이란 공공폐수처리구역의 폐수를 처리하여 공공수역에 배출하기 위한 처리시설과 이를 보완하는 시설을 말한다.
- (사) “슬러지”란 하수 또는 폐수의 처리 과정에서 부산물로 생성된 부유물질이 가라앉아 생긴 침전물을 말한다.
- (아) “증발농축”이란 용액중의 용매를 증발시킴으로써 용해되어 있는 용질의 농도를 높이는 조작을 말한다.

4) 물환경보전법 시행규칙 [별표 2] 수질오염물질

5) 물환경보전법 시행규칙 [별표 5] 수질오염방지시설

6) 물환경보전법 시행규칙 [별표 4] 폐수배출시설

## II. 폐수 증발농축공정의 현황





## II. 폐수 증발농축공정의 현황

### 1. 폐수 배출 및 처리 현황<sup>1)</sup>

#### 1) 폐수배출시설 및 배출량 현황

2021년도 기준 전국 폐수배출업소는 56,430개소로 전년대비 1,560개소 (2.8%) 증가하였으며, 전국 폐수배출량은 5,006천 $m^3$ /일로 전년 대비 164천  $m^3$ /일(3.4%)이 증가하는 등 2012년부터 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다 [그림 II-1].



[그림 II-1] 폐수배출시설 및 배출량 추이

1) 환경부·국립환경과학원, 2023년 산업폐수의 발생과 처리

## 2) 사업장 규모별 폐수배출량 현황

폐수배출시설에서 나오는 폐수배출량에 따라 사업장을 1종부터 5종까지 구분하게 되는데<표 II-1><sup>2)</sup> 일일 폐수배출량이 50m<sup>3</sup> 이하인 5종 사업장이 2021년 기준 51,655개소로 전체 폐수배출업소의 91.5%를 차지하고 있다<표 II-2>. 폐수발생량은 배출 업소수가 가장 적은 1종의 376개소 배출업소에서 전체 폐수의 61.7%가 발생하며, 업소수가 가장 많은 5종에서 16.8%, 2~4종에서 21.5%가 발생하는 것으로 조사되었다. 배출량은 적으나 업소수가 많은 5종의 경우, 소규모 폐수배출시설로써 상대적으로 영세한 사업장이 많아 수질오염방지시설의 노후 및 운영관리의 한계, 환경기술인의 부재, 사고대응 체계 미흡 등 대규모 배출시설에 비해 환경관리 측면에서 열악한 실정이어서 지속적인 관리가 중요하다(박재홍 등, 2018). 이러한 사업장에서 배출되는 폐수의 적정처리를 위한 폐수처리업 제도가 운영중에 있으며, 2020년 「물환경 보전법」 개정을 통해 폐수처리업을 등록제에서 허가제로 변경하고, 폐수 위·수탁 처리과정에서 폐수 간 반응여부 확인을 의무화하는 등 폐수처리업 관리를 강화하였다.

〈표 II-1〉 사업장의 규모별 구분

종류	배출규모
1종 사업장	1일 폐수배출량이 2,000m <sup>3</sup> 이상인 사업장
2종 사업장	1일 폐수배출량이 700m <sup>3</sup> 이상, 2,000m <sup>3</sup> 미만인 사업장
3종 사업장	1일 폐수배출량이 200m <sup>3</sup> 이상, 700m <sup>3</sup> 미만인 사업장
4종 사업장	1일 폐수배출량이 50m <sup>3</sup> 이상, 200m <sup>3</sup> 미만인 사업장
5종 사업장	위 제1종부터 제4종까지의 사업장에 해당하지 아니하는 배출시설

※ 1년 중 폐수를 가장 많이 배출한 날을 기준으로 함

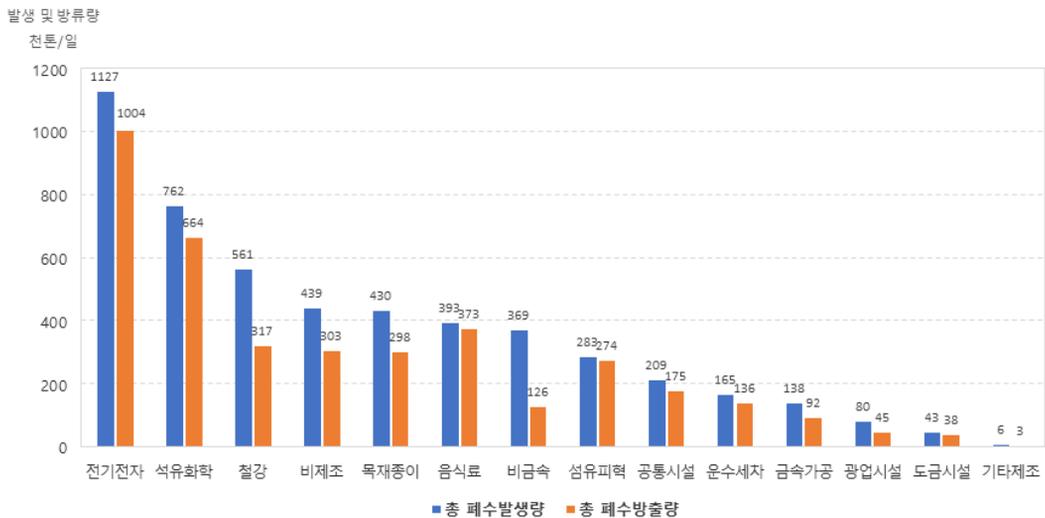
2) 물환경보전법 시행령 [별표 13] 사업장의 규모별 구분

〈표 II-2〉 종별 사업장수 및 폐수방류량(2021년 기준)

종류	사업장수 (개소)	폐수배출량 (천m <sup>3</sup> /일)
1종 사업장	376	3,088
2종 사업장	547	466
3종 사업장	1,303	372
4종 사업장	2,549	239
5종 사업장	51,655	840
계	56,430	5,005

### 3) 업종별 폐수배출량 현황

2021년 기준 업종별 폐수발생량은 전기전자, 석유화학, 철강 순으로 나타났으며[그림 II-2], 2020년 대비 전기전자 126천m<sup>3</sup>/일(12.6%), 석유화학 40천m<sup>3</sup>/일(5.5%), 철강 55천m<sup>3</sup>/일(10.8%) 증가한 수치이다. 특히 반도체 및 전자부품 분야의 생산량 증가로 인해 폐수 배출량도 늘어나면서 폐수를 재이용하거나 오염 물질을 최소화하는 기술개발 노력도 중요해지고 있다.



〈그림 II-2〉 업종별 폐수 발생 및 방류량(2021년 기준)

#### 4) 폐수처리 형태별 현황

폐수의 처리형태는 ①개별, 공동처리 또는 면제승인 후 직접방류, ②공공하수처리시설 유입처리, ③공공폐수처리시설 유입처리 3가지 형태와 전량 위탁처리, 전량 재이용 등 폐수를 방류하지 않는 무방류처리로 분류할 수 있다. 공공폐수처리시설은 산업단지, 농공단지, 또는 공장밀집지역에서 배출되는 다량의 산업폐수를 공동으로 처리하여 배출하기 위해 설치·운영하며 오염원 배출 원인자 부담원칙으로 비용을 부담하고 있다. 처리 형태별 배출업소수는 전량 위탁처리가 포함된 무방류처리 배출업소가 가장 많은 비중을 차지하며, 폐수발생량은 직접방류 배출업소가 가장 많은 것으로 나타났다<표 II-3>.

<표 II-3> 폐수처리 형태 구분(2021년 기준)

처리형태	업소수 (개수)	폐수발생량 (천 <sup>m</sup> <sup>3</sup> /일)	폐수배출량 (천 <sup>m</sup> <sup>3</sup> /일)
무방류처리	25,248 (45%)	570	0
직접방류	14,547 (26%)	2,211	1,837
공공하수처리시설	13,933 (25%)	1,324	1,183
공공폐수처리시설	2,702 (5%)	901	829

#### 5) 폐수처리 방법별 현황

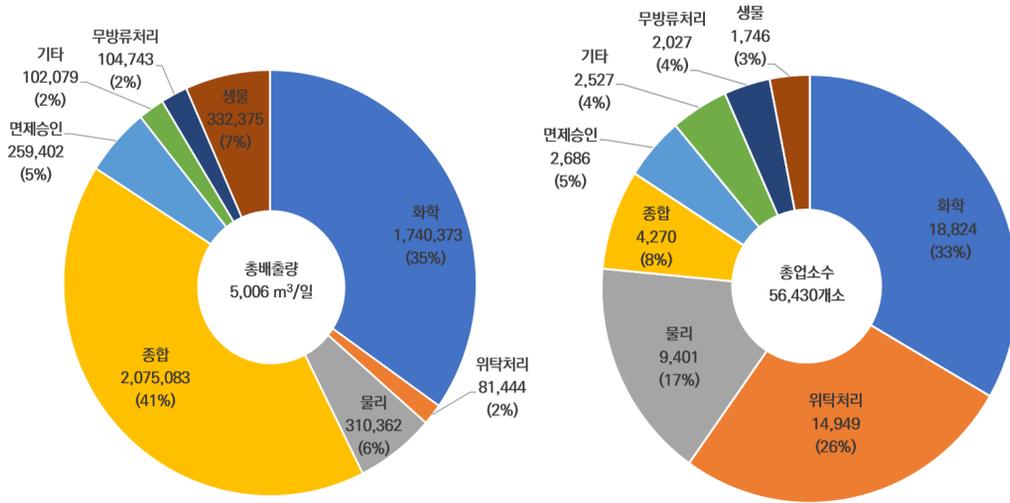
폐수배출시설에서는 배출되는 오염물질에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 처리 등 다양한 방식을 적용한 수질오염방지시설을 설치하여 운영하고 있다<표 II-4>. 2021년 기준 폐수처리 방법별 배출업소 현황은 화학적 처리, 위탁처리, 물리적 처리, 종합처리(물리+화학+생물) 순이며, 전체 업소의 26%가 위탁처리에 의해 폐수를 처리하는 것으로 나타났다[그림 II-3].

[그림 II-4]는 2012년부터 2021년까지 위탁처리를 실시하는 업소수와 폐수 발생량 변화를 나타낸 것이다. 소규모 사업장에서 위탁하는 고농도 난분해성 폐수의 증가와 폐수위탁업체 및 폐수처리업체 증가에 따른 폐수 인계인수과정의

투명성 강화와 체계적인 관리를 위해 환경부에서는 2019년부터 폐수배출자(위탁자)와 처리자(수탁자) 간 위탁폐수의 인계인수와 운반, 처리과정을 전자인계인수서로 관리하는 ‘물바로시스템’을 운영하고 있다.

〈표 II-4〉 산업폐수 처리방법

처리방법	내용
물리	물리적처리시설로 조합된 시설
화학	화학적처리시설로 조합된 시설 물리적처리시설과 화학적처리시설로 조합된 시설
생물	생물학적처리시설로 조합된 시설 물리적처리시설과 생물학적처리시설로 조합된 시설 화학적처리시설과 생물학적처리시설로 조합된 시설
종합	물리적처리시설, 화학적처리시설, 생물학적처리시설이 모두 조합된 시설
무방류	「물환경보전법」에 따라 폐수무방류배출시설로 설치허가를 받은 사업장에 설치된 폐수 무방류배출시설의 수질오염방지시설
위탁처리	폐수를 전량 위탁처리하는 사업장의 위탁집수조 등의 시설
면제승인	폐수중의 오염물질이 항상 배출허용기준 이하로 배출되는 것으로 인정되어 폐수를 처리하지 않고 배출시설에서 직접 공공수역으로 배출하는 시설
기타	위 분류이외의 방법으로 폐수를 처리하는 방법



[그림 II-3] 폐수처리 방법별 배출업소 및 폐수발생량 현황(2021년도)

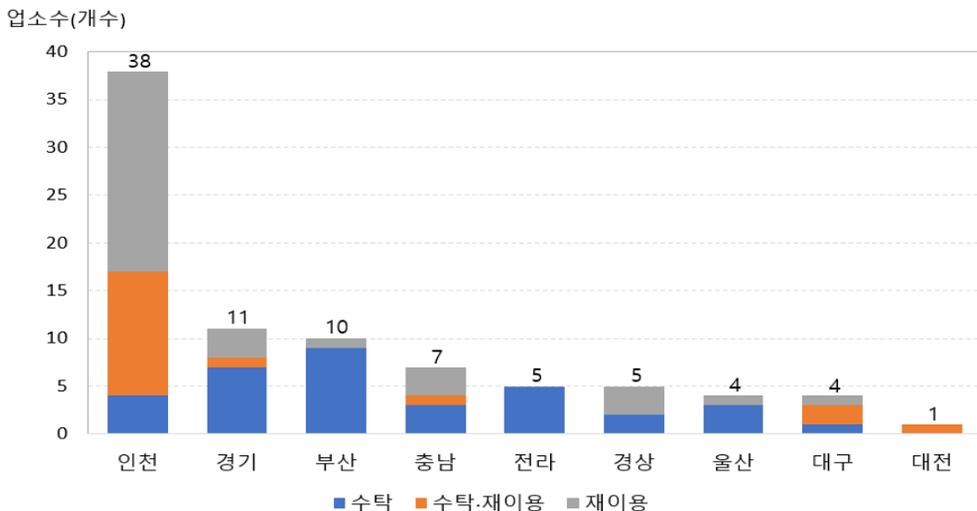


[그림 II-4] 위탁처리 업소수 및 폐수발생량 추이

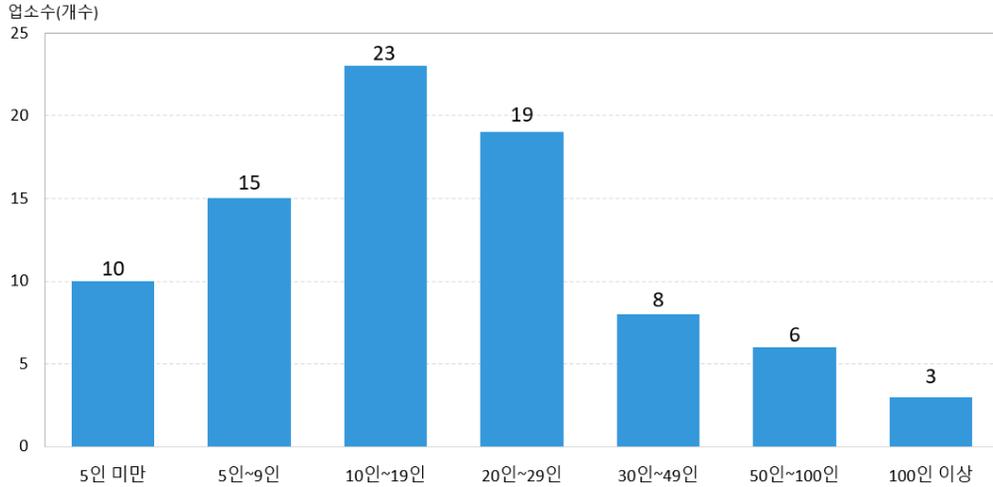
## 6) 폐수처리업 현황

폐수처리업은 폐수의 수탁처리를 위한 영업을 의미하며, 폐수배출량이 적은 사업장이나 수질오염방지시설 설치를 면제받은 사업장의 경우 발생된 폐수를 위탁처리할 수 있다. 폐수처리업은 폐수 수탁처리업과 폐수 재이용업으로 구분할 수 있는데 폐수 수탁처리업은 폐수처리시설을 갖추고 수탁받은 폐수를 재생·이용 외의 방법으로 처리하는 영업을 말하며, 폐수 재이용업은 수탁받은 폐수를 제품의 원료·재료 등으로 재생·이용하는 영업을 말한다. 폐수처리업을 하기 위해서는 환경부령으로 정하는 바에 따라 기술능력과 시설 및 장비를 갖추어 환경부장관의 허가를 받아야 한다.

[그림 II-5]는 2023년 5월 기준, 폐수처리업으로 등록된 사업장의 지역별 분포현황을 나타내었다. 전국 폐수처리업소 85개 중 38개소(45%)가 인천 서구 및 남동 공단 지역에 편재해 있으며, 이중 수탁처리업소(수탁, 수탁·재이용)는 17개소로 수도권지역 내에서 가장 많이 집중되어 있다. [그림 II-6]은 폐수처리업으로 등록된 사업장의 근로자수 규모별 분포현황으로 50인 미만의 소규모 사업장이 75개소로 89%를 차지하는 것으로 나타났다.



[그림 II-5] 전국 폐수처리업 등록 현황(2023년 5월 기준)



[그림 II-6] 전국 폐수처리업 근로자수 규모별 현황(2023년 5월 기준)

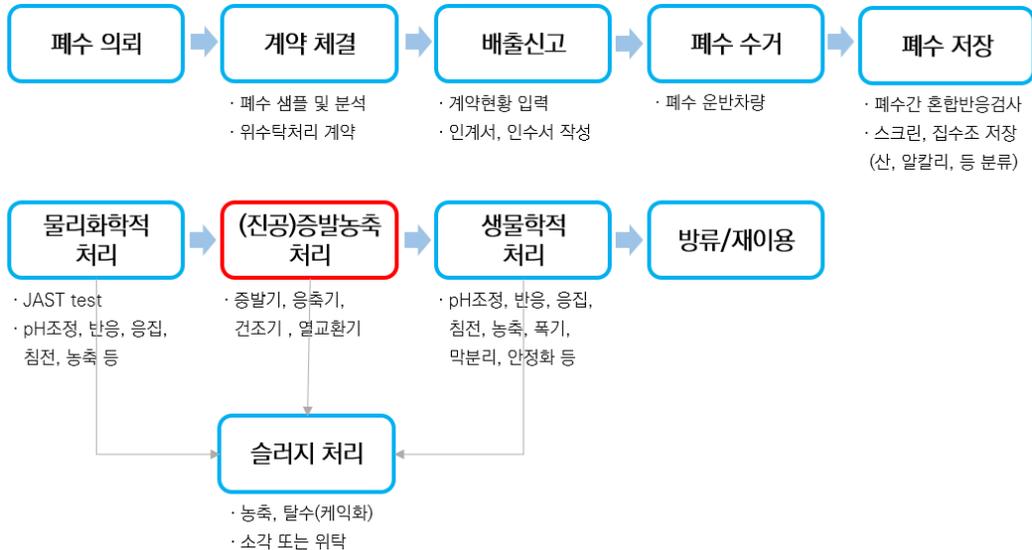
산업안전보건법 제19조(안전보건관리담당자)에 따라 폐수처리업의 경우 2019년부터 상시근로자 20명 이상 50명 미만인 사업장은 안전보건관리담당자<sup>3)</sup>를 1명 이상을 지정하도록 하고 있으나 57%(48개소)에 달하는 20인 미만인 사업장은 선임 의무가 없어 안전보건 관리 측면에서 여전히 ‘사각지대’에 머물러 있다고 할 수 있다.

### 7) 폐수처리업의 폐수처리절차

환경부에 등록된 폐수처리업 등록현황(2015년 기준)에 의하면 79개 폐수처리업 사업장 중 81%인 64개소가 증발농축공정을 사용하고 있으며, 대부분 전처리(물리화학)→증발농축(건조)→후처리(생물)의 과정으로 폐수를 처리하는 것으로 나타났다. 반입되는 폐수의 특성에 따라서 전처리, 후처리 공정 및 증발농축 장치에는 차이가 있을 수 있다.

3) 선임의무 사업장 : 제조업, 임업, 하수·폐수 및 분뇨 처리업, 폐기물 수집·운반 및 원료 재생업 등(산업안전보건법 시행령 제24조(안전보건관리담당자의 선임 등))

폐수위탁업체(배출자)가 폐수처리를 의뢰하면 폐수처리업체에서 폐수 샘플을 채취 및 분석하여 처리가능여부를 확인한 후 계약을 체결하게 된다. 계약 및 인계인수 정보를 “물바로시스템”에 입력하고 폐수 운반차량으로 수거하여 산, 염기, 일반 등 성상별로 분류하여 집수조에 저장한다. 수탁폐수를 다른 수탁폐수와 혼합하여 처리하려는 경우에는 폐수 간 반응여부(부식성, 폭발성, 자연발화성, 유해성)를 확인 후 혼합해야 한다. 중화, 침전 등의 물리화학 처리 공정을 거쳐 폐수 내 고형분과 침전물질을 제거한 후, 침전조에서 상등액을 분리하여 증발농축기에 투입하고 가열하면서 증발된 증기는 응축 과정을 거쳐 처리수로 배출한다. 농축액은 건조기로 이송되어 일정 함수율까지 수분을 제거한 후 슬러지로 배출되어 처리되며 슬러지는 자체 또는 위탁처리에 의해 소각하거나 매립하게 된다. 응축수는 폭기, 침전, 여과 등의 생물학적 처리 등을 통해 배출허용기준에 적합하도록 처리한 후 방류한다[그림 II-7].



[그림 II-7] 폐수처리업의 폐수처리 과정

## 2. 폐수 배출·처리 관련 법령 및 안전관리 현황

산업폐수는 생활하수에 비해 배출량이 상대적으로 적고 처리율이 높지만 수질오염물질의 농도가 높고 오염 부하량이 절대적으로 많아 철저한 관리가 요구된다(김경민, 2015). 산업폐수 관리체계는 기본적으로 「물환경보전법」에 근거하여 배출시설 설치 허가 및 신고제도, 입지 제한, 배출허용기준 적용, 지도·점검 등을 통하여 규제되고 있다.

### 1) 폐수배출시설 설치 및 운영

물환경보전법의 폐수배출시설에 해당하는지 여부를 판단하기 위해서 사업자는 사전에 시설별 특정수질유해물질<sup>4)</sup> 배출여부와 1일 최대 폐수배출량을 파악하고, 표준산업분류에 의한 폐수배출시설 분류에 해당하는지, 설치제한지역인지 등을 검토하여야 한다<sup>5)</sup>. 폐수배출시설로 설치 허가를 받거나 신고를 하고 해당 시설을 설치하는 경우, 배출되는 수질오염물질을 물환경보전법 제32조에 따른 배출허용기준 이하로 처리할 수 있는 수질오염방지시설을 설치해야 한다(표 II-5)<sup>6)</sup>. 폐수 배출시설과 방지시설의 정상적인 운영·관리를 위하여 사업장의 범위에 맞는 자격기준을 갖춘 환경기술인을 임명해야 하며, 환경기술인은 종사자의 법 준수를 위한 지도·감독하고, 시설이 정상적으로 운영되도록 관리하여야 한다(표 II-6)<sup>7)</sup>. 또한 폐수배출시설에서 나오는 수질오염물질이 배출허용기준에 맞는지 확인하기 위해 측정기기를 부착하여야 한다(표 II-7)<sup>8)</sup>.

4) 물환경보전법 시행규칙 [별표 3] 특정수해유해물질(구리, 납, 비소, 수은과 그 화합물, 시안화합물, 유기인화합물 등 32가지 물질)

5) 환경부, 폐수배출시설 인허가 업무 안내서(2022.1)

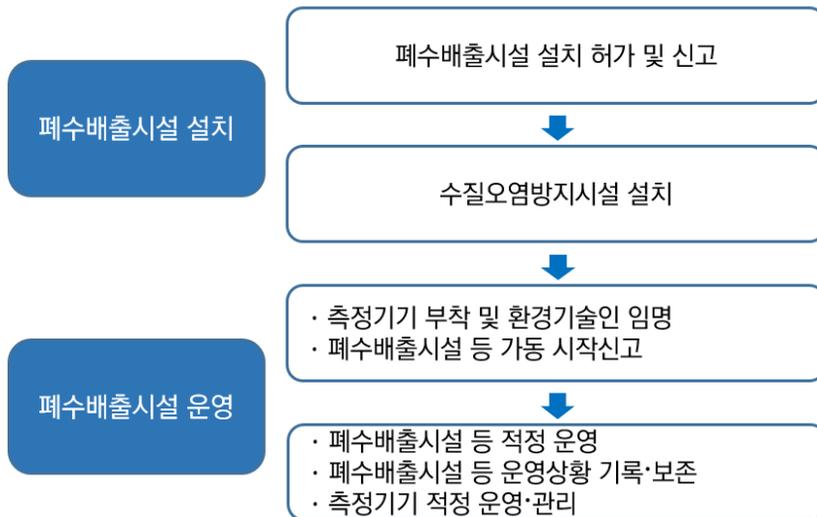
6) 물환경보전법 시행규칙 [별표 5] 수질오염방지시설

7) 물환경보전법 시행령 [별표 17] 사업장별 환경기술인의 자격기준

8) 물환경보전법 시행령 [별표 7] 측정기기의 종류 및 부착 대상

〈표 II-5〉 수질오염방지시설

<p><b>1. 물리적 처리시설</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>가. 스크린</li> <li>나. 분쇄기</li> <li>다. 침사시설</li> <li>라. 유수분리시설</li> <li>마. 유량조정시설(집수조)</li> <li>바. 혼합시설</li> <li>사. 응집시설</li> <li>아. 침전시설</li> <li>자. 부상시설</li> <li>카. 탈수시설</li> <li>타. 건조시설</li> <li>파. 증류시설</li> <li>하. 농축시설</li> </ul>	<p><b>2. 화학적 처리시설</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>가. 화학적 침강시설</li> <li>나. 중화시설</li> <li>다. 흡착시설</li> <li>라. 살균시설</li> <li>마. 이온교환시설</li> <li>바. 소각시설</li> <li>사. 산화시설</li> <li>아. 침전물 개량시설</li> </ul>	<p><b>3. 생물학적 처리시설</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>가. 살수여과상</li> <li>나. 폭기시설</li> <li>다. 산화시설</li> <li>라. 혐기성·호기성 소화시설</li> <li>마. 접촉조</li> <li>바. 안정조</li> <li>사. 돈사툼밥발효시설</li> </ul>
<p>4. 제1호부터 제3호까지의 시설과 같거나 그 이상의 방지효율을 가진 시설로서 환경부장관이 인정하는 시설</p>		
<p>5. 별표 6에 따른 비점오염저감시설</p>		



[그림 II-8] 물환경보전법에 의한 폐수배출시설 관리체계

〈표 II-6〉 사업장별 환경기술인의 자격기준

사업장 구분	환경기술인 자격
제1종사업장	수질환경기사 1명 이상
제2종사업장	수질환경산업기사 1명 이상
제3종사업장	수질환경산업기사, 환경기능사, 또는 3년 이상 수질분야 환경관련 업무에 직접 종사한 자 1명 이상
제4종사업장· 제5종사업장	배출시설 설치허가를 받거나 설치신고가 수리된 사업자 또는 사업자가 그 사업장의 배출시설 및 방지시설 업무에 종사하는 피고용인 중에서 임명하는 자 1명 이상

〈표 II-7〉 측정기기의 종류 및 부착대상 사업장

구분	수질자동 측정기기 <sup>1)</sup>	부대시설		적산 전력계	적산유량계	
		자동시료 채취기	자료 수집기		용수	하수· 폐수
1~3종사업장	○	○	○	○	○	○
4종사업장	-	-	-	○	○	○
5종사업장	-	-	-	○	○	○

1) 수소이온농도(pH), 총유기탄소량(TOC), 부유물질량(SS), 총질소(T-N), 총인(T-P)

## 2) 폐수위탁처리

폐수배출시설은 수질오염물질을 배출허용기준 이하로 처리할 수 있는 수질오염 방지시설을 설치해야 하는데 폐수처리업자 또는 환경부장관이 인정하여 고시하는 관계 전문기관에 환경부령으로 정하는 폐수를 전량 위탁처리하는 경우는 수질오염 방지시설 설치가 면제된다. 발생하는 폐수량이 적어 방지시설을 갖추기에는 채산성이 없거나 적정처리에 고비용이 소요되는 폐수를 발생시키는 사업장에서 폐수를 위탁처리하게 된다(한대호, 2014). 위탁처리를 하기 위해서는 위탁처리할 폐수의 종류·양 및 수질오염물질별 농도에 대한 예측서, 위탁처리계약서 등의 서류를 제출해야 하며, 폐수를 위탁하는 사업자와 폐수처리업자는 해당 폐수의

인계·인수에 관한 내용 등을 전자인계·인수관리시스템에 입력하여야 한다<sup>9)</sup>. 입력 사항으로는 위탁하는 사업자 및 폐수처리업자 정보, 폐수의 종류, 단위 및 수량과 폐수를 운반하는 차량번호 및 운전자 성명 등이 있다.

폐수를 위탁처리하는 업체의 경우 영세성으로 인한 재정능력의 부족과 환경관리를 위한 전문인력 확보가 어려운 경우가 많고, 이로 인해 폐수 성상파악, 폐수 저장 및 관리, 그리고 위탁의 과정이 적정하게 이루어지지 못해 수탁처리업체와의 위수탁 계약 시 기피 대상이 되기 쉽다(한대호, 2017). 수탁폐수처리업체에 대한 실태조사결과에서도 위탁처리업체에서 폐수의 성상 및 함유물질 등에 대한 정확한 정보를 주지 않아 계약 전 실험실에서 분석한 결과를 토대로 수탁불가로 처리하는 등 고충을 토로한 바 있다.

### 3) 폐수처리업 허가 및 운영

폐수처리업을 하기 위해서는 환경부령으로 정하는 바에 따라 기술능력과 시설 및 장비를 갖추어 환경부장관의 허가를 받아야 한다(표 II-8). 환경부는 폐수처리업의 안전관리기준을 강화하고자 2020년 물환경보전법 하위법령을 개정하였다. 등록제에서 허가제로 변경되면서 허가절차, 기술능력, 시설 및 장비 등의 허가기준을 마련했으며, 수탁받은 폐수를 다른 폐수와 혼합 처리하는 경우 사전에 부식성, 폭발성, 자연발화성, 유해성 확인을 통해 폐수 간 반응여부 등을 확인하도록 했다(표 II-9). 또한 폐수처리업의 폐수처리시설이 폐수처리업의 허가기준(표 II-10)에 적합하게 유지·관리되고 있는지를 확인하기 위해 정기 검사를 도입하여 허가받은 후 3년 이내 최초검사, 이후 매 3년마다 검사기준에 적합한지 검사기관으로부터 검사를 받도록 하고 있다.

9) 물환경보전법 제66조의2제2항 수탁폐수처리의 전산관리

〈표 II-8〉 폐수처리업의 허가요건

폐수처리업의 허가요건(물환경보전법 시행규칙 별표20) (폐수수탁처리업 내용만 발췌)	
구분	폐수수탁처리업
1. 기술능력	가. 수질환경산업기사 1명 이상 나. 수질환경산업기사, 대기환경산업기사 또는 화공산업기사 1명 이상
2. 시설 및 장비	<p>가. 저장시설</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 폐수저장시설의 용량은 1일 8시간(1일 8시간 이상 가동할 경우 1일 최대가동시간으로 한다) 최대처리량의 3일분 이상의 규모이어야 하며, 반입폐수의 밀도를 고려하여 전체 용적의 90% 이내로 저장될 수 있는 용량으로 설치하여야 한다.</li> <li>2) 폐수는 폐수처리방법별로 구분·저장할 수 있도록 구획·표시되어 있어야 하며, 수탁폐수의 혼합으로 인한 폭발 등의 위험이 있는 경우에는 별도의 저장시설을 설치하여야 한다.</li> <li>3) 저장시설은 저장폐수에 부식되지 아니하는 재질로 설치하여야 한다.</li> <li>4) 유입폐수와 보관된 폐수의 적산유량을 계측할 수 있는 구조로 설치하여야 한다.</li> <li>5) 작업시의 안전을 고려하여 덮개·가스배출구 및 폐수처리시설로 이송하기 위한 고정식 파이프라인의 구조로 설치하여야 한다.</li> </ol> <p>나. 처리시설</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 처리시설은 배출허용기준 이내로 처리할 수 있도록 다음의 시설 중 하나 이상을 설치하여야 하며, 허가기관에서 인정한 수탁처리대상의 폐수를 물리화학적처리시설 또는 생물화학적처리시설을 이용하여 배출허용기준 이내로 처리할 수 있다고 인정하는 경우에는 해당 처리시설을 추가하여 설치할 수 있다. 가) 증발농축시설, 나) 건조시설, 다) 소각시설, 라) 허가기관이 가)부터 다)까지의 시설과 같은 수준 이상의 효율이 있다고 인정하는 시설</li> <li>2) 폐수처리시설의 총 처리능력은 7.5m<sup>3</sup>/시간 이상이어야 한다.[위 1)의 가)부터 라)까지의 시설의 처리 능력 합을 말하며, 증발농축시설의 후처리과정의 건조시설과 같이 주처리시설의 후처리 과정의 시설은 제외한다.]</li> <li>3) 폐수처리시설은 다음과 같이 설치하여야 한다.                     <p>가) 증발농축시설</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 시설의 유입수와 응축수(응축수 발생시설에 한한다)의 적산유량을 측정할 수 있는 시설을 설치하여야 한다.</li> <li>(2) 증발농축 잔류물이 외부로 누출되지 않는 구조로 설치하여야 한다.</li> <li>(3) 응축수가 발생하는 처리공정의 시설은 응축수 처리시설을 설치하여야 한다.</li> </ol> <p>나) 건조시설</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 건조 잔류물의 수분함량이 75% 이하의 성능이어야 한다.</li> <li>(2) 건조 잔류물이 외부로 누출되지 않는 구조로 설치하여야 한다.</li> </ol> <p>다) 소각시설</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 처리능력은 2m<sup>3</sup>/시간 이상이어야 한다.</li> </ol> </li> </ol>

구분	폐수수탁처리업
	<p>(2) 소각시설의 연소실 출구 배출가스 온도조건은 최소 850℃ 이상, 체류 시간은 최소 1초 이상이어야 한다.</p> <p>(3) 연소실은 연소가스가 일정시간 체류할 수 있고 충분히 혼합될 수 있는 구조로 설치하여야 한다.</p> <p>(4) 연소실의 공기 및 폐수 공급량을 조절할 수 있는 장치를 설치하여야 한다.</p> <p>(5) 폭발·화재 등의 사고에 대비한 안전구조로 설치하여야 하고, 소화기 등 소화 장비를 갖추어야 한다.</p> <p>(6) 휴대용 일산화탄소측정기 및 산소측정기를 비치하고, 온도를 자동계측·기록할 수 있는 설비를 갖추어야 한다.</p> <p>(7) 시설 유입폐수의 적산유량을 계측할 수 있는 시설을 설치하여야 한다.</p> <p>라) 물리화학적처리시설(1)의 가)부터 라)까지의 시설의 전처리 또는 후처리 시설은 제외한다. 이하 같다]</p> <p>(1) 처리능력은 4m³/시간 이상이어야 한다.</p> <p>(2) 대상폐수는 허가기관에서 물리화학적처리시설을 이용하여 배출허용기준 이내로 처리가 가능하다고 인정한 수탁처리대상의 폐수로 한정한다.</p> <p>(3) 삭제</p> <p>(4) 폐수처리약품의 양이 일정하게 주입될 수 있는 시설을 설치하여야 한다.</p> <p>마) 생물화학적처리시설(1)의 가)부터 라)까지의 시설의 전처리 또는 후처리 시설은 제외한다. 이하 같다]</p> <p>(1) 처리능력이 4m³/시간 이상이어야 한다.</p> <p>(2) 대상폐수는 허가기관에서 생물화학적처리시설을 이용하여 배출기준 이내로 처리가 가능하다고 인정한 수탁처리대상의 폐수로 한정한다.</p> <p>(3) 삭제</p> <p>(4) 생물화학적처리에 필요한 약품류 등의 양이 일정하게 주입될 수 있는 시설을 갖추어야 한다.</p> <p>바) 기타 부대시설</p> <p>(1) 저장시설 및 처리시설에서 발생하는 악취물질 및 대기오염물질 처리를 위한 방지시설과 측정구를 설치하여야 한다.</p> <p>(2) 처리시설의 잔류물·슬러지 등 폐기물을 적정 보관할 수 있는 보관소를 설치하여야 하며, 주변 토양오염 및 빗물 혼입을 방지할 수 있는 구조로 설치하여야 한다.</p> <p>4) 작업 시 안전을 위한 보호구 및 소화기를 비치하여야 한다.</p> <p>5) 처리시설 전면에 처리공정도 및 폐수배관도를 누구나 알아볼 수 있도록 설치·부착하여야 하고, 폐수처리에 필요하지 아니한 배관을 설치하여서는 아니 된다.</p> <p>6) 폐수를 처리하여 최종 배출하는 방류구는 외부에서의 방류상태 관찰 및 검사를 위한 시료채취가 쉽게 설치하여야 한다.</p>

구분	폐수수탁처리업
다. 운반시설	1) 폐수운반장비는 용량 2 <sup>m³</sup> 이상의 탱크로리, 1 <sup>m³</sup> 이상의 합성수지제 용기가 고정된 차량이어야 한다. 다만, 아파트형 공장 내에서 수집하는 경우에는 고정식 파이프라인으로 갈음할 수 있다. 2) 폐수운반장비는 운반폐수에 부식되지 아니하는 재질로서 운반 도중 폐수가 누출되지 아니하도록 안전한 구조로 되어 있어야 한다. 3) 폐수운반 장비는 내부용량을 계측할 수 있는 구조 또는 그 양을 확인할 수 있도록 되어 있어야 한다. 4) 폐수운반차량은 청식[색번호 10B5-12(1016)]으로 도색하고, 양쪽 옆면과 뒷면에 가로 50cm, 세로 20cm 이상 크기의 노란색 바탕에 검은색 글씨로 폐수운반차량, 회사명, 허가번호, 전화번호, 용량을 지워지지 아니하도록 표시하여야 한다. 5) 운송 시 안전을 위한 보호구, 중화제 및 소화기를 갖추어 두어야 한다.
3. 실험실 및 실험기기 ·기구	가. 실험실 1) 공장 안에 설치하고 구획되어 있을 것 2) 바닥과 내면은 불연성 자재로서 실험에 지장이 없는 구조로 되어 있을 것 3) 급수수도전과 세척시설에는 배수시설이 되어 있을 것 4) 위 3)에서의 배수시설을 통한 실험폐수는 수질오염방지시설로 유입될 수 있을 것 5) 환기장치가 되어 있을 것 6) 항상 실험이 가능하도록 되어 있을 것 7) 실험실에서 발생된 폐수를 제2가목의 저장시설로 유입처리할 수 있도록 고정식 파이프라인을 설치하거나 수질오염방지시설을 설치할 것
나. 실험기기 ·기구	다음 항목을 측정할 수 있는 실험기기·기구 및 시약을 갖추어야 한다. 1) 수소이온농도(pH) 2) 생물학적산소요구량(BOD) 3) 총유기탄소량(TOC) 4) 부유물질(SS) 5) 페놀 6) 시안 7) 총크롬 및 6가크롬 8) 아연 9) 구리 10) 카드뮴 11) 비소 12) 납 13) 용해성 망간 14) 플루오르 15) 수은

**<표 II-9> 폐수 간 반응여부 등의 확인방법**

**폐수 간 반응여부 등의 확인방법(물환경보전법 시행규칙 별표20의2)**

1. 공통사항

- 가. 폐수처리업자는 수탁받은 폐수를 다른 수탁폐수와 혼합하여 처리하려는 때에는 사전에 폐수가 발생한 공정과 폐수의 성분·성상 등을 파악한 후, 혼합처리과정에서의 부식성, 폭발성, 자연발화성, 유해성(이하 “유해성등”이라 한다)을 확인(이하 “혼합확인”이라 한다)해야 한다. 이 경우 폐수처리업자는 수탁폐수의 혼합확인을 위해 필요하면 위탁자에게 수탁폐수에 관한 자료를 요청할 수 있다.
- 나. 수탁폐수의 혼합확인 결과 유해성등이 있다고 판단되는 경우에는 해당 특성을 고려하여 처리방법 등을 결정해야 한다.
- 다. 혼합확인을 위한 시료의 혼합비율은 수탁폐수와 혼합하려는 폐수의 양의 비율로 한다.
- 라. 폭발성 가스를 측정할 경우에는 주변에 전기, 불꽃, 화염, 마찰열 등 발화 원인이 없는지 확인하고, 환기가 잘 되는 곳에서 시행한다.
- 마. 혼합확인을 하는 자는 보호장갑, 보호경 등 개인 보호장비를 착용해야 한다.

2. 수탁폐수 간 혼합확인 시 확인사항

- 가. 폐수처리업자는 수탁폐수를 다른 수탁폐수와 혼합하여 처리하려는 경우 유해성등을 확인해야 하며, 확인사항 및 확인기준은 아래 표와 같다.

구분	확인사항	확인기준
부식성	수소이온농도	pH 2.0 이하 강산성 또는 pH 11.5 이상 강염기
폭발성	가연성 가스농도	메탄 10% 이상
자연발화성	자연발화 여부	5분 이내 자연발화 여부
유해성	황화수소농도	10ppm 이상
	이산화탄소농도	1.5% 이상
	산소농도	18% 미만 또는 23.5% 이상

- 나. 가목에 따른 확인사항을 확인할 때에 유해성등의 확인기준을 초과하여 폭발, 자연발화의 우려가 있는 경우에는 혼합하지 않고 별도로 처리해야 하며, 그 밖에 작업자의 안전에 위해를 가할 우려가 있는 경우에는 충분한 안전조치를 해야 한다. 다만, 폐수처리업자의 시설에서 처리하기 어려운 경우에는 해당 폐수의 처리를 위탁한 자에게 반송 등의 조치를 해야 한다.
- 다. 수탁폐수를 다른 폐수와 혼합할 때 10℃ 이상의 급격한 온도 상승이나 가스·연기·악취 등의 이상 현상이 발생하는 경우에는 그 원인을 파악하고 혼합 처리 가능 여부를 판단해야 한다.

3. 확인사항별 확인방법

구분	확인방법
부식성	1) 혼합확인을 위한 시료는 내부식성(부식을 건디는 성질)용기에서 혼합한다. 2) 혼합 직후의 수소이온농도(pH)와 10분간 교반(휘저어 섞음) 후 수소이온농도를 측정하여 측정값의 변화를 관찰한다. 3) 수소이온농도의 측정은 pH 측정기기를 활용해야 한다.

구분	확인방법
폭발성 및 유해성	1) 혼합확인을 위한 시료는 밀폐용기에서 혼합한다. 2) 밀폐용기의 공기층에 흡입용 호스를 삽입한 후 가스농도측정기로 혼합직후의 가스농도와 30분 후의 가스농도를 측정하여 측정값의 변화를 관찰한다.
자연발화성	1) 혼합 직후의 온도와 10분간 교반 후의 온도를 측정하여 측정값의 변화를 관찰한다. 2) 혼합폐수를 규조토 또는 실리카겔을 채운 500 ml 용량의 자기로 된 용기에 부어 5분 이내에 발화하는지를 확인한다.

4. 기타

가. 수탁폐수의 혼합확인 결과, 이상이 없는 경우에는 이후 같은 사업장에서 배출되는 같은 성상의 수탁폐수에 대해서는 혼합확인을 생략할 수 있다. 다만, 배출공정 등의 변경으로 수탁폐수의 성상이 변경되었거나 성상이 변경될 수 있는 경우에는 혼합확인을 해야 한다.

나. 수탁폐수 중 사진현상 등과 관련된 폐수에 대해서는 다른 종류의 폐수와 혼합하여 처리하지 않고 해당 사진폐수만을 별도로 수거하여 처리하는 경우에는 혼합확인을 생략할 수 있다.

다. 혼합확인에 사용되는 측정기기는 공기기관의 검정·교정을 받아야 하며, 검정·교정 성적서의 유효기간이 만료되지 않도록 관리해야 한다.

라. 폐수처리업자는 혼합확인을 한 경우에는 별지 제45조서식에 따라 결과를 작성하고 3년간 보관해야 한다.

### 〈표 II-10〉 폐수처리시설의 검사기준

#### 폐수처리시설의 검사기준(물환경보전법 시행규칙 별표20의3)

##### 1. 저장시설

- 가. 저장용량은 최대 처리량의 3일분 이상일 것
- 나. 폐수처리방법별로 구분·저장할 수 있도록 구획·표시되어 있을 것
- 다. 저장폐수에 부식되지 않는 재질일 것
- 라. 유입폐수와 보관된 폐수의 적산유량을 계측할 수 있는 구조일 것
- 마. 그 밖에 폐수처리업의 허가요건에 맞는 구조·성능 및 장비를 갖추고 있을 것

##### 2. 처리시설

- 가. 개별 처리시설의 처리능력 및 처리시설의 합인 처리능력 기준을 준수할 것
- 나. 처리시설의 설치기준에 맞는 구조와 부대시설 등이 설치되어 있을 것
- 다. 배출허용기준을 준수할 것
- 라. 작업 시 근로자의 안전을 위한 보호구 및 안전장비를 갖추고 있을 것
- 마. 폐수처리에 필요하지 않은 배관이 설치되어 있지 않을 것
- 바. 그 밖에 폐수처리업의 허가요건에 맞는 구조·성능 및 장비를 갖추고 있을 것

수탁폐수 간 반응여부의 확인을 위해 실시하는 항목 중 자연발화성의 경우, 혼합폐수를 구조토 또는 실리카겔을 채운 용기에 부어 5분 이내 발화유무를 확인해야 하며, 혼합 직후의 온도와 10분간 교반 후의 온도를 측정하여 변화를 관찰하도록 되어 있다[그림 II-9]<sup>10)</sup>. 10℃ 이상의 급격한 온도상승이나 가스, 연기, 악취 등의 이상현상이 발생하는 경우 원인을 파악하고 혼합 처리 가능 여부를 판단해야 한다. 그러나 증발농축 및 증발건조 처리 과정의 온도 조건과 정상운전 범위를 이탈하여 온도가 상승하는 조건에서의 혼합위험성은 아니기 때문에 이로 인한 발열과 열분해에 의한 화재폭발 위험성을 사전에 예방하는데 혼합확인으로는 한계가 있는 것으로 판단된다.

확인 결과						
구분		저장폐수	수탁폐수	혼합 직후	혼합 반응 후	위험·유해성 분류기준
부식성	pH					pH 2.0 이하 강산성 또는 pH 11.5 이상 강염기
폭발성	메탄(%)	/				메탄 10% 이상
유해성	이산화탄소(%)					1.5% 이상
	황화수소(ppm)					10ppm 이상
	산소(%)					18% 미만 또는 23.5% 이상
자연발화성	자연발화			[ ]유 [ ]무 [ ]유 [ ]무	5분 내 자연발화	
기타	온도(℃)					
	가스 발생(연기 등)				[ ] 유 [ ] 무	
	악취 발생				[ ] 유 [ ] 무	
처리결과	[ ] 혼합 저장 [ ] 별도 저장 [ ] 반송					
특이 사항			사진대지			
			실험 전		실험 후	

210mm×297mm[백상지(80g/m<sup>2</sup>) 또는 중골지(80g/m<sup>2</sup>)]

[그림 II-9] 수탁폐수의 혼합확인 결과서(일부 발취)

10) 물환경보전법 시행규칙 [별지 제34호 서식]

#### 4) 폐수 수탁업 사업장 방문조사

폐수처리를 위해 증발농축공정을 사용하는 수탁업 및 수탁·재이용업 사업장의 증발농축공정에 대한 안전관리 현황을 조사하고자 사업장을 방문하여 인터뷰를 실시하였다.

##### (1) 사업장 정보

6개 사업장을 방문하여 안전보건공단 경기지역본부 광역사고조사센터에서 개발한 「폐수 슬러지 처리공정 체크리스트」를 기반으로 설비 관계자와 인터뷰를 진행하였으며, 증발농축 및 건조공정을 포함한 폐수처리시설과 실험실 현장 확인 및 공정관리, 설비관리 분야로 나누어 실태 등을 조사하였다.

증발농축공정의 경우, 5개 사업장은 다단효용증발기(MEE), 1개 사업장은 기계식압축증발기(MVR)를 사용하고 있었으며, MVR타입의 경우 펌프(heat pump)로 증기를 기계적으로 압축하게 되는데 펌프는 주로 외국에서 수입하여 환경전문공사업으로 등록된 업체에서 설치를 해주고 있었다.

〈표 II-11〉 폐수수탁업 방문사업장 현황

구분	규모 구분	업종
A 사업장	50명~99명	수탁
B 사업장	30명~49명	수탁·재이용
C 사업장	30명~49명	수탁·재이용
D 사업장	10명~29명	수탁·재이용
F 사업장	50명~99명	수탁
G 사업장	10명~29명	수탁

## (2) 실태조사 결과

### 가) 수탁폐수 성상 및 수탁폐수 간 혼합 확인

물환경보전법에 따라 수탁받은 폐수를 다른 폐수와 혼합하여 처리하는 경우, 사전에 폐수가 발생한 공정과 폐수의 성분·성상 등을 파악한 후, 혼합처리과정에서의 부식성, 폭발성, 자연발화성, 유해성을 확인하도록 되어 있다.

6개 사업장 모두 수탁받은 폐수에 대해 계약 체결전에 폐수 성상을 확인하는 절차를 거친 후, 수탁폐수 간 혼합 확인을 실시하는 것으로 조사되었다. 밀폐용기에 폐수를 혼합 후 공기층에 호스를 삽입하여 가스농도측정기로 가연성 가스농도(메탄, 황화수소, 이산화탄소, 산소농도)를 측정하고, 연1회의 검정·교정을 통해 장비를 관리하고 있으며 일부 사업장은 휴대용산소기를 별도로 보유하고 있었다. 산, 염기 구분을 위해 수소이온농도를 측정하게 되며, 혼합 확인을 위해 혼합 직후 및 10분간 교반 후 수소이온농도와 온도를 측정하여 부식성 및 자연발화성을 확인하고 있었다. 또한 TOC와 COD<sup>11)</sup>, 금속성분 분석 등을 통해 휘발성의 유기용제, 중금속 등이 고농도로 포함되어 있을 경우 처리비용 증가 등으로 인해 수탁을 받지 않는 경우도 있었다.

### 나) 증발농축(건조)기 관리

온도계, 압력계 및 수위계 등의 계측제어장치는 설치되어 있으나, 압력계는 진공만 측정가능한 진공 게이지가 설치되어 있고 압력 발생시 이를 해소하기 위해 A, B 사업장은 판체크밸브, C, F 사업장은 비상통기(emergency vent)설비 형태, G 사업장은 파열판이 설치되어 있었으며 안전밸브는 모두 설치되어 있지 않았다.

11) TOC(Total Organic Carbon) : 총유기탄소량, COD(Chemical Oxygen Demand) : 화학적산소요구량

다) 정상조건 이탈시 경보장치

A 사업장은 미설치, B 사업장은 설정 온도를 초과하면 관련 설비가 가동중지 되면서 경보 울림, C, D, F, G 사업장은 건조기 교반모터의 전류값이 설정 압페어(일반적으로 11A~15A이며, 폐수 농축정도 및 성상에 따라 달라짐) 이상시 스팀 공급차단과 운전실에 경광등과 경보기가 작동되도록 구성되어 있었다.

라) 이상반응(급격한 온도와 압력 상승)시

스팀 공급차단과 냉각수 공급의 연동(인터록)은 모두 미설치되어 있으나 냉각수 공급은 수동 조작으로 가능하도록 구성되어 있었다.

〈표 II-12〉 증발농축(건조)기 설비관리 실태

구분	온도계, 압력계	정상운전 범위 초과시 경보장치	이상반응시 스팀 공급 차단 및 냉각수 공급
A 사업장	진공 게이지, 판체크밸브	×	×
B 사업장	진공 게이지, 판체크밸브	○	×
C 사업장	진공 게이지, 비상통기설비(Cover 형태)	△	×
D 사업장	진공 게이지	△	×
F 사업장	진공 게이지, 비상통기설비(Cover 형태)	△	×
G 사업장	진공 게이지, 파열판	△	×

### 마) 안전보건관리체계

안전보건공단 경기지역본부 광역사고조사센터와 합동으로 조사한 안전보건 관리체계 실태결과<sup>12)</sup>를 <표 II-13>에 나타내었다.

**<표 II-13> 안전보건관리체계 실태**

구분	내용
안전운전절차서	F 사업장을 제외하고 모두 설비 제조사에서 제공한 운전매뉴얼을 수정없이 안전운전절차서로 작성하여 보관하고 있었으며, 최초의 시운전, 정상운전, 비상시 운전, 정상적인 운전정지, 정비 또는 정기보수 후의 운전개시 등 운전단계별로 운전절차 내용이 포함되어 있지 않음. ※ F 사업장 : 비상상황 및 조치(정전, 냉각수 및 보일러 스팀 공급 중단시), 고장의 발견과 수리(진공도가 낮거나 온도가 높은 경우) 등 포함
변경요소관리 계획	기존 설비 사용(최근 경기 불황으로 신규 설비 추가 또는 증설 없음) 및 동일한 운전조건·절차 유지 등의 이유로 변경관리 실행의 필요성을 인지하지 못해 변경관리 시스템이 구축되어 있지 않았고, 이에 따른 변경관리 등급에 의한 위험성평가도 실시되지 않음.
안전작업 허가지침	A 사업장을 제외하고 안전작업허가의 종류, 발급, 승인 등과 작업허가 전 점검사항 및 조치사항 등이 규정된 지침의 작성이 미흡함. ※ A 사업장은 일반위험작업허가서, 화기작업허가서, 보충작업허가서로 구분하여 발급, B 사업장은 화기작업허가서 발급, C 사업장은 안전작업 허가서 미발급, D, G 사업장은 안전작업허가지침 구축 진행 중, F 사업장은 밀폐공간작업 허가서를 발급하고 있음.
비상조치계획	모든 사업장이 유해화학물질 취급시설 검사 서면자료와 장외영향평가서(황산, 수산화나트륨(가성소다) 등의 산·알칼리 유해화학물질 사용으로 작성 대상임)를 활용하여 작성하고 있으며, 비상훈련은 연1회 이상 실시하고 있음. ※ 다만, 비상훈련은 주로 사업장내 일반 화재를 중심으로 실시되고 있고, 유해화학물질 누출 및 폭발 등의 시나리오에 의한 실시는 미흡함
밀폐공간작업 프로그램 운영	A, B, F, G 사업장은 수립하여 시행하고 있고, C, D 사업장은 운영 준비 중이며 모든 사업장이 밀폐공간작업의 위험성 및 프로그램 운영의 필요성에 대하여 인지하고 있음

12) 안전보건공단 중앙사고조사단, 2023 반복사고 기획조사 결과보고서

구분	내용
위험성평가	<p>모든 사업장에서 연1회 정기적으로 실시하여 위험요인을 도출하여 개선하고 있으며, 위험성평가 결과도 교육 등을 통해 공유 하고자 노력하고 있음.</p> <p>- A, C, D, F, G 사업장은 KRAS 기법, B 사업장은 4M 기법을 사용하고 있음</p> <p>※ 다만, 위험성평가의 위험요인이 끼임, 떨어짐, 넘어짐 중심으로 실시되고 있으며, 폐수처리 공정별 화재·폭발 위험요인에 대한 위험성평가가 미흡하여 보완이 필요함</p>
개인보호구 비치 및 활용	<p>화학물질관리법에 의한 유해화학물질 취급시설 검사 정기적 실시 등 관련 법령에 적합하도록 개인보호구 및 방재설비가 현장에 비치되어 있고, 폐수 처리시 착용하도록 관리하고 있음</p> <p>※ 다만, 공기호흡기 또는 송기마스크는 B, C, F, G 사업장은 자체적으로 보유하고 있고, A, D 사업장은 필요시 안전보건공단 또는 밀폐공간 작업업체로부터 대여하여 사용하고 있음</p>
안전교육	<p>산업안전보건법 근로자 안전보건교육의 정기교육(매분기 6시간 이상)에 따라 모두 실시하고 있었으나, 특정작업(밀폐공간작업 등)을 수행하는 근로자에 대한 특별안전보건교육(16시간 이상) 실시는 미흡함.</p>
환경처리시설	<p>폐기물 관리법 시행규칙 [별표8] 폐기물처리업자의 준수사항에 따라 폐수처리 후 발생한 슬러지는 자체적으로 소각하거나 위탁하여 소각 또는 매립하게 됨.</p>

### 3. 폐수처리방법

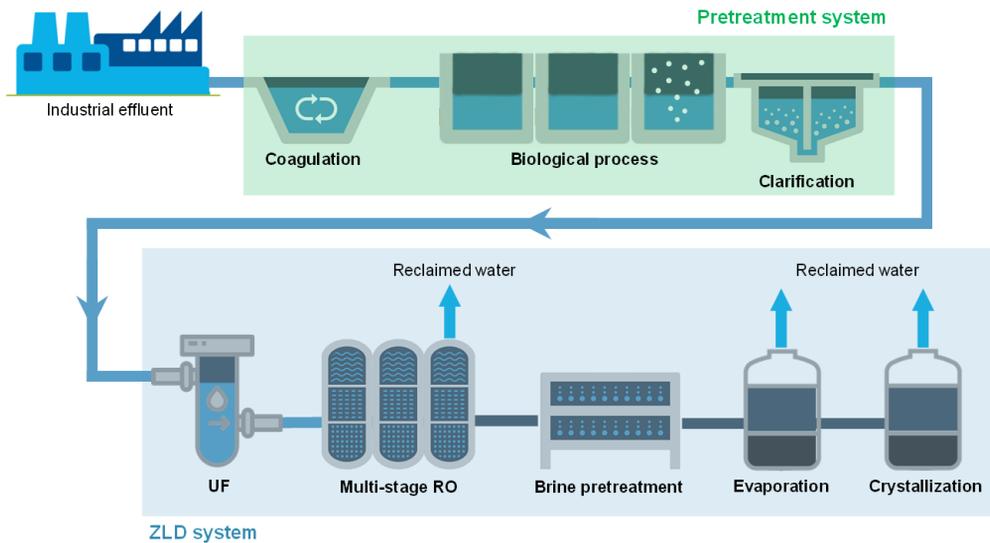
산업폐수에 포함되는 물질은 발생원에 따라 유기화합물, 무기물, 중금속, 부유 및 현탁 고형물, 미생물, 유류, 산, 알칼리 등 매우 다양하다. 폐수는 물이라는 용매(solvent)에 오염물질이라는 용질(solute)이 섞여 있는 용액 또는 혼합액으로 볼 수 있으며, 폐수의 처리는 오염물질의 농도를 낮추는 희석(dilute)의 과정으로 오염물질을 폐수로부터 분리, 감소시켜야 한다. 오염물질만 별도로 분리할 수 없기 때문에 오염물질의 농도가 높은 슬러지(sludge)로 분리하여 수분의 함량을 줄이는 농축(concentration) 과정을 거쳐 최종적으로 슬러지를 재이용하거나 폐기처리하고, 각종 오염물질의 슬러지를 단계적으로 분리시키고 남은 처리수는 배출허용기준을 준수하여 방류하거나 용도에 맞게 처리하여 재이용하게 된다(월드에너지, 2011). 재이용하는 경우를 무방류시스템(ZLD, Zero Liquid Discharge)이라 하며(그림 II-10) 오염된 폐수를 처리한 뒤 하천으로 방류하지 않고 정화하여 재이용하고, 오염물은 슬러지로 만들어 배출하는 공정이다. 수질오염 방지와 물의 재이용이 중요해지면서 무방류시스템의 적용은 전 세계적으로 증가하고 있으나 설치비가 높고 에너지 사용량이 많은 단점으로 인해 ZLD 확대의 걸림돌로 작용하고 있다(박지혜, 2020)

#### 1) 폐수처리과정

일반적인 폐수처리 과정은 1차 처리, 2차 처리, 3차(고도)처리, 슬러지 처리로 구성된다(그림 II-10). 이를 기본으로 폐수의 성상과 특성에 따라 가감되거나 변경될 수 있으며 처리 과정에는 물리적, 화학적, 생물학적 처리방법 등으로 구분되는 여러 개의 단위조작을 조합하여 사용한다. 1차 처리는 침전성 유기 및 무기 고형물과 부유물질<sup>13)</sup>을 스크린, 여과, 침강 등의 방법을 이용하여 제거

13) 물속에 현탁되어 탁도를 유발하는 불용성 물질로서, 여과지에 여과되지 않고 걸리는 물질(SS, Suspended Solids)

하는 물리적 처리 과정으로 용존고형물질<sup>14)</sup>은 제거되지 않고 남아있게 된다. 2차 처리는 1차 처리 배출수를 생물학적 처리방법을 이용하여 유기물 성분 중 미생물의 활동(소화)에 의해 분해될 수 있는 용해성 유기물을 제거하는 과정이며, 3차(고도) 처리는 2차 처리에서 제거되지 않은 질소, 인, 난분해성 유기물, 중금속 등의 제거를 목적으로 하며 물리적 처리와 화학적 처리를 결합하거나 생물학적 처리방법을 사용하게 된다<표 II-14>. 염색이나 축산 분뇨와 같이 고농도의 난분해성물질을 함유한 폐수의 경우 생물학적 처리만으로는 방류수 수질기준을 준수하는데 한계가 있어 1차 처리로 화학적 처리를 도입하며, 3차 처리에서도 화학적 처리나 고도산화처리방식을 도입하여 방류수 수질기준을 준수하게 된다(이정임, 2018).

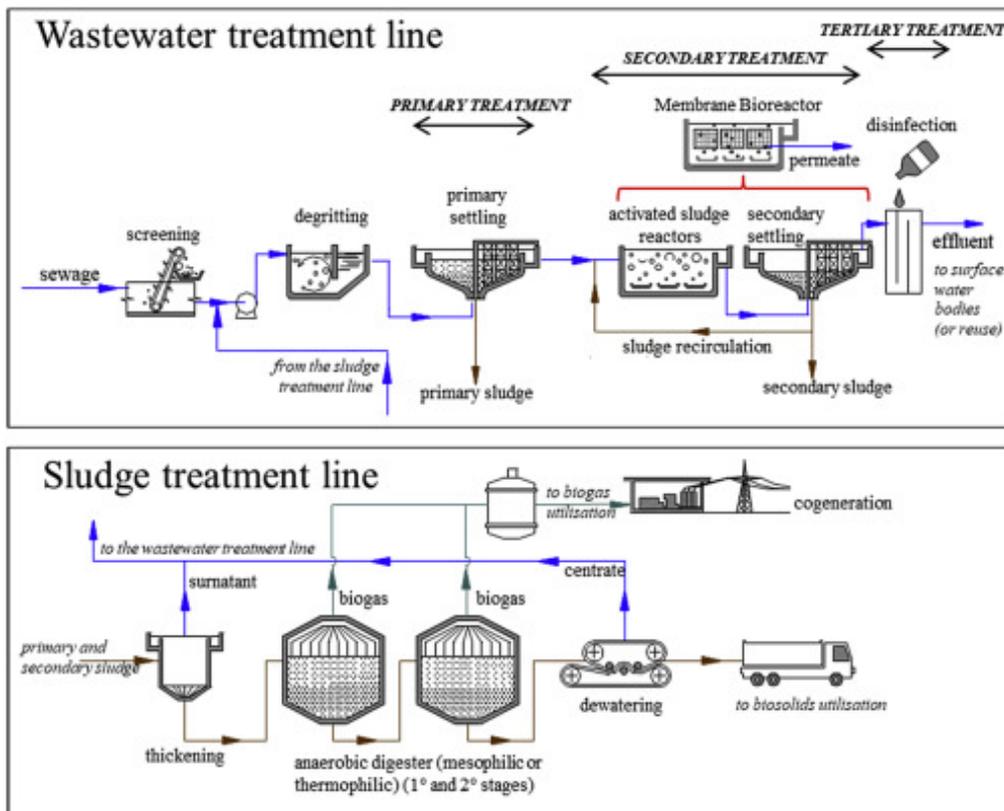


**[그림 II-10] 산업폐수의 무방류시스템 구성도**

[출처: Making Waves: Zero Liquid Discharge for Sustainable Industrial Effluent Management, Water, 2021, 13(20), 2852]

14) 여과지를 통과한 용존상태나 콜로이드 상태의 고형물질(DS, Dissolved solids)

슬러지 처리는 화학적 및 생물학적 처리과정에서 발생한 고형물을 처리하는 과정이다. 대부분의 슬러지는 수분과 부패하기 쉬운 유기성분을 다량 함유하고 있어 감량화 혹은 무해화를 목적으로 농축, 소화, 탈수, 건조 등의 다양한 전처리가 필요하며 최종적으로 매립 또는 소각되거나 고체연료, 바이오매스 등으로 재사용되기도 한다(이철호).



[그림 II-11] 폐수처리과정(Paola Foladori 등)

〈표 II-14〉 산업폐수 중의 주요 오염물질과 처리기술

처리공정	오염물질	처리기술
1차 처리	고체(부유물질, 현탁유 등 포함)	침전·부상·응집(물리·화학적 처리)
2차 처리	유기물(생물학적 분해가능)	생물학적 처리
3차 처리	유기물(생물학적 분해 불가능)	고도처리(질소, 인 제거), 활성탄 흡착
	무기물(용액)	이온교환·역삼투·전기투석·산화·여과

[출처: (주)천수환경산업 누리집]

## 2) 폐수처리방법

폐수처리 방법은 크게 물리적, 화학적, 생물학적 처리로 구분되며, 폐수의 성상과 특성에 따라 조합하여 선택하게 된다.

### (1) 물리적 처리방법

물리적 처리는 폐수 내의 비용해성물질을 침전, 여과 등의 물리적인 작용에 의하여 처리하는 것으로 스크린, 혼합, 침전, 부상, 여과 등이 이에 속한다.

〈표 II-15〉 물리적 처리의 주요 시설

시설	내용
스크린	폐수처리의 첫 단계로써 폐수 중에 함유된 고형물질(큰 부유물)을 제거하여 펌프 등의 기계류를 보호하고, 폐수관로 막힘, 침전조의 스크래퍼 파손, 밸브의 막힘 및 고장 등을 방지하기 위해 필요한 장치임.
침사시설	폐수 중의 자갈, 모래, 금속류, 기타 무기물 등을 제거하기 위한 장치로써 펌프 및 기계류를 보호하고 배수관로의 폐쇄를 방지하지 위해 설치함. 유속을 조절하여 유기물을 제외한 무기물만 침전시켜 제거함.
유수분리시설	폐수 중의 유분을 물과의 비중 차이를 이용하여 분리하여 제거함.
유량조정시설	폐수의 유량 및 수질 변동으로 인해 발생할 수 있는 오염물질 처리 효율 저하를 방지하기 위해 폐수의 유입, 유량, 및 농도 변동을 조절하여다음 처리 시설에서 일정한 유량과 오염물질 부하를 유지함.
침전시설	폐수를 정지(靜置)해 두면 현탁한 고형물의 일부가 플록(Floc)이 되어 중력에 의하여 자연침강되어 고액분리됨.

시설	내용
부상시설	물보다 가벼운 물질인 유지류, 부유고형물, 미생물 슬러지 등의 표면에 미세한 공기방울을 부착시켜 부력증가로 수면위로 부상시켜 분리 및 제거함.
여과시설	공극이 있는 다공질의 매질층에 액체를 통과시켜 침전에서 제거되지 않은 미세한 부유물질 성분을 제거함.
농축시설	슬러지 처리 시 후속공정의 처리효율 향상 및 운전비용을 줄이기 위해 수분을 제거하여 농축시킴.
탈수시설	농축된 슬러지를 자연건조 또는 기계적으로 압착 탈수시킴으로써 함수율을 낮추어 슬러지의 양을 감소시키고 취급을 용이하게 함.

[출처: 울산대학교 폐수처리공학, 화재보험협회]

## (2) 화학적 처리방법

화학적 처리는 폐수 내의 유기성분의 콜로이드상 및 용존상태의 고형물을 화학 약품을 투입하여 중화, 산화, 환원 등의 화학반응을 거쳐 오염물질을 제거하는 방법이다.

〈표 II-16〉 화학적 처리의 주요 시설

시설	내용
중화시설	산성 및 알칼리 폐수를 중화시켜 생물학적 처리에 악영향을 미치지 않게 하거나 응집, 환원, 산화반응을 용이하게 하기 위해 최적의 pH로 조정하는 시설임. 대표적인 산 중화제로는 염산, 황산 등이 있으며, 알칼리 중화제로는 가성소다, 소석회, 생석회 등이 있음.
응집시설	폐수 중에 함유되어 있는 콜로이드 상태의 부유물질이나 중금속류를 응집제와 반응시켜 부유물질의 입자를 크게 뭉치게 하거나, 금속수산화물을 형성시켜 침전을 용이하게 함.
산화시설	폐수 중의 불용해성 유기물과 수용성 금속이온을 산화시켜 제거하거나 페놀, CN <sup>-</sup> 등을 분해 및 제거함.
환원시설	6가 크롬(Cr <sup>6+</sup> )을 함유한 폐수를 pH 2.5~2.8이 되도록 황산을 주입한 후, 환원제(NaHSO <sub>3</sub> 등)를 넣어 불용성의 3가 크롬(Cr <sup>3+</sup> )으로 환원시켜 침전 제거함.

시설	내용
이온교환	기능기(Functional group)를 가진 이온교환수지를 사용하는 용액 중의 이온을 교환하여 분리함으로써 폐수중의 유용자원을 회수하고 오염물질을 제거함

### (3) 생물학적 처리방법

생물학적 처리방법은 폐수 내에 존재하는 유기물중 미생물에 의해서 분해 가능한 유기물을 미생물을 이용하여 제거하는 방법으로 산소 필요성의 유무에 따라 호기성 방법과 혐기성 방법으로 구분되며, 미생물의 배양방법에 따라 부유성장법과 부착성장법으로 분류할 수 있다.

〈표 II-17〉 생물학적 처리의 주요 시설

시설	내용
혐기성 처리	혐기성 미생물의 혐기성 호흡(anaerobic respiration)과 발효를 이용하는 것으로 산소공급이 필요 없음. 유기물은 유기산이나 알코올을 지나 탄산가스, 수소가스, 메탄, 질소가스, 암모니아, 황화수소 등으로 분해됨.
호기성처리	산소를 이용하는 미생물의 호기성 호흡(aerobic respiration)을 이용하는 것으로 미생물이 유기물을 탄산가스, 물, 암모니아로 분해하며, 암모니아는 소화에 의해 초산까지 산화됨. 활성슬러지법, 회전원판법, 침지여상법 및 살수여과상법 등이 있음.
살수여과상 (trickling filter)	1차 침전지의 유출수를 미생물로 된 점막으로 덮인 쇠석이나 기타 매개층 등 여재 위에 뿌려 생물막과 폐수 내의 유기물을 접촉시키는 고정상법에 의한 처리
활성슬러지법	호기성 조건하에서 폐수 내의 유기물질을 기질로 하여 미생물에 의한 호흡 및 합성 과정을 통해 폐수내의 유기물질을 제거함
폭기 (aeration) 시설	물 속에 공기를 불어넣거나 공중에 물을 살포하여 물과 공기를 충분히 접촉시킴으로써 유기성물질의 산화작용과 호기성 세균에 의한 소화작용을 촉진시킴.

[출처: 한국상하수도협회, 화재보험협회]

## 4. 증발농축공정

증발농축공정에 의한 폐수처리는 폐수에 열을 가하여 증발된 증기는 응축 과정을 거쳐 처리수로 배출하거나 회수하여 재사용하고, 농축액은 건조과정을 거쳐 슬러지로 최종적으로 처리하는 것이다. 운전비용이 적게 소요되고, 고농도의 난분해성 폐수의 처리 효율이 높아 산업용 폐수처리 및 자원 재활용분야를 비롯하여 전기도금, 제약, 식품, 섬유, 염색산업 등의 여러 분야에서 다양하게 이용되고 있다(양권석, 2018).

증발농축장치는 운전압력의 조건에 따라 상압식과 감압식으로 나눌 수 있으며, 증발방식에 따라 수직관 강제 순환식, 수평관 충격 유하식, CALANDRIA 방식으로 나뉘고, 이러한 형태의 증발기는 에너지의 재이용 이방식에 따라 TVR, MVR, 다중 효용관 방식으로 구분된다(강진영, 2020).

### 1) 증발농축기의 분류

#### (1) 운전조건에 의한 분류

운전조건에 따라 상압식, 감압식으로 나눌 수 있다. 상압식의 경우, 대기압에서 증발된 증기는 대기방지시설(흡수탑 등)을 통한 후 대기로 방출하게 되며, 감압식의 경우 진공압(100~150torr)에서 증발되며 증발된 증기는 전량 응축기에서 응축된 후 배출되거나 재이용하게 된다.

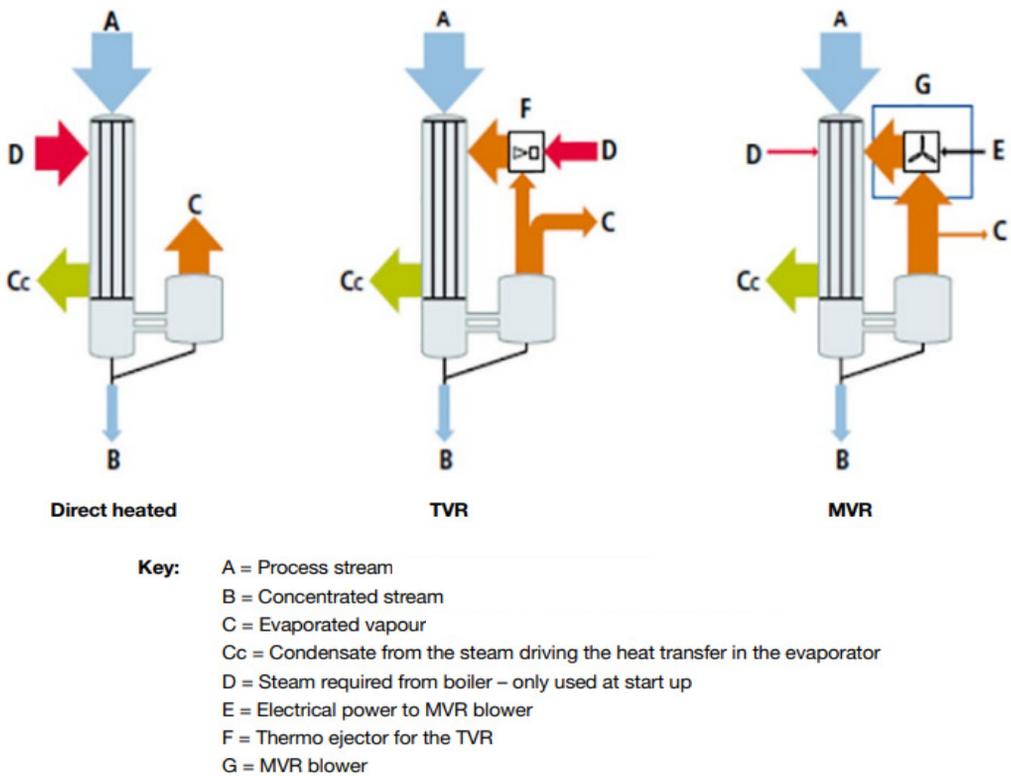
#### (2) 증발방식에 의한 분류

증발기 내부에 구성된 전열면의 위치 및 형태에 따라 3가지 방식으로 분류할 수 있다. 전열면이 증발기 내부에 구성되어 증발과 응축이 동시에 수행되는 수평관 충격 유하식, 열교환기와 증발기가 별도로 구성되고 고온·고압에서 감압하여

비등점을 낮추면서 순간 증발(flash evaporation)시켜 고농축하는 수직관 강제 순환식, 증발기 내부에 열교환기가 수직으로 설치되고 폐수를 순환·교반하면서 열교환에 의해 증발시키는 CALANDRIA 방식이 있다(양권석, 2018).

### (3) 에너지 재이용방식에 의한 분류

증발농축장치들은 폐수 증발시 많은 에너지가 소비되기 때문에 증발 잠열을 최대한 이용하여 에너지 비용을 최소화하는 연구들이 수행되고 있으며, 그 중 열적 증기 재압축(MVR)과 기계적 증기 재압축(TVR) 방식을 이용하여 다단 효율(Multi Effects)하여 폐수의 증발에 적용되어 제품화 및 판매되고 있다(홍원석, 2015).



[그림 II-12] 3가지 타입의 증발기

[출처: EECA, MVR system for evaporation, distillation and drying, 2019]

[그림 II-12]는 직접가열 방식과 TVR, MVR을 비교한 그림으로 화살표는 질량 흐름의 크기에 해당하며 빨간색은 시스템에 입력되는 에너지 또는 증기를 나타낸다. 원료는 증발기의 튜브로 공급(A)되고 농축용액(B)이 증발된 증기(C)에서 분리되며, 증발기에 사용된 보일러(D)의 증기는 응축수(Cc)로 제거된다. 직접 가열 증발기(Direct heated)에서 증기(C)는 다음 단계 또는 효용(effect)으로 공급되는 반면, TVR의 경우 증발된 증기(C)의 일부는 이젝터(F)로 흡입하여 공급 증기(D)와 혼합하여 열교환기의 열원으로 재투입하는 방식이며, MVR의 경우 송풍기(G)는 증발된 증기(C)의 온도와 압력을 높여 열원으로 투입하게 되며 공급 증기(D)는 초기 가열시 에너지로 사용된다.

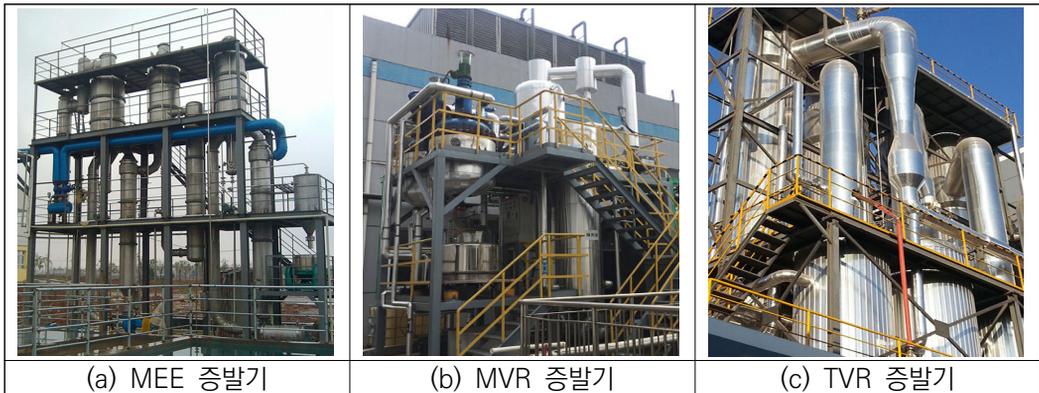
#### 가) TVR(Thermal Vapor Recompression) 방식

TVR은 증발기에서 증발된 증기를 증기 이젝터(ejector)에 의해 흡입·압축하여 열교환기의 폐수를 가열하는 방식으로 1-Effect, 2-Effect, Multi-Effect가 있다. 저압의 증기를 회수하여 압력을 상승시켜주는 방식이며 에너지 절약 효과가 크기 때문에 증발 공정에 적용되어 열이용 효율을 상승시켜준다(김득원, 2016). 운전구조상 열 증기 압축기를 작동하려면 구동 증기(motive steam)로 불리는 일정량의 새로운 증기가 필요하며, TVR로 흡입되는 증기의 양은 구동 증기의 압력과 유량에 따라 달라지기 때문에 기액분리기에서 나온 증기의 일부는 응축기를 통해 액으로 변환된다. 2단 이상의 효용관을 사용할 경우 전단계에서 증발되는 증기의 열량을 다음 단계의 열원으로 사용하며, 최종단계에서 증발된 증기의 일부를 재이용하게 됨으로써 매우 높은 에너지효율을 가질 수 있다.

#### 나) MVR(Mechanical Vapor Recompression) 방식

증발기에서 증발된 증기를 이젝터 대신 열펌프(heat-pump)를 이용, 전량 회수하여 기계적 압축방식으로 가압·승온하여 얻은 고온·고압의 증기를 자체의 가열원으로 재이용하는 방식으로 에너지 비용 절감차원에서 이용되고 있다. MVR 방식은 ① 증발량과 연계한 MVR 유기적 운전의 어려움, ② 과도한 열교환 면적

필요, ③ 열교환기의 스케일 생성에 따른 증발량 감소, ④ 휘발성 성분들의 동시 증발과 다량의 거품생성에 따른 응축수의 수질 저하로 재처리 필요 등 다양한 문제점이 있어 이를 개선하기 위한 연구들도 진행되고 있다. 특히 다양한 오염물질을 함유하고 있는 산업폐수 속에 존재하는 금속이온들에 의해 열교환기에 침적되는 스케일 생성은 이러한 고효율 저에너지를 사용하는 폐수 증발장치들의 운전성능을 현저히 저하시켜 장기적인 운전이 곤란해질 수 있다(홍원석, 2015).



[그림 II-13] 증발기 설치 예

[출처: <http://en.cnenco.com>]

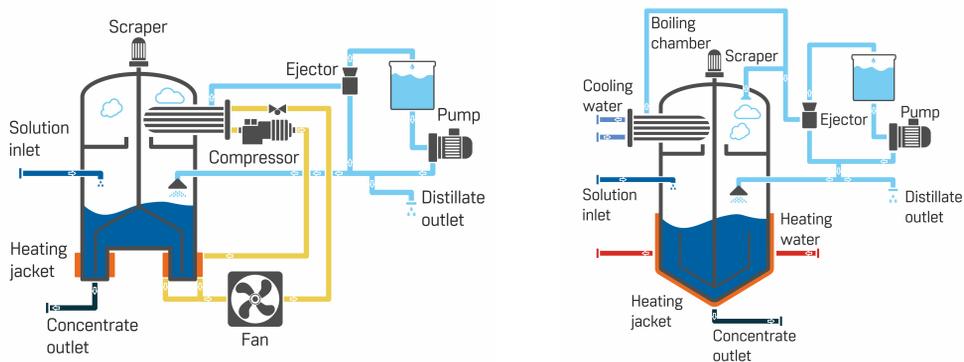
#### 다) 다중 효용 증발기(MEE, Multi Effects Evaporator)

여러 개의 단일 효용 증발기가 서로 연결된 증발기를 말하며, 증발된 증기를 다음 단(effect) 증발기에 순차적으로 공급하여 열원으로 이용하는 방식이다. 다중 효용 증발기에서 첫 번째 효용에 의해 생성된 2차 증기는 응축기로 들어가지 않지만 두 번째 효용을 위한 가열 매체로 재사용된다. 새로운 스팀 소비량을 약 50%까지 효과적으로 줄일 수 있으며 이 원리를 반복적으로 사용하여 새로운 스팀 소비량을 더욱 줄이게 된다. 첫 번째 효용의 최대 가열 온도와 마지막 효용의 최소 끓는점 온도가 전체 온도 차이를 형성하고 각 효용에 분포되고 결과적으로 효용 개수가 증가함에 따라 온도 차이는 감소하게 된다. 효율이 증가함에 따라 가열 면적이 증가하여 증기 비용이 점차 감소하지만 동시에 설치비용도 늘어나게 된다.

## 2) 건조·결정화 처리공정

증발농축시스템을 거쳐 1차로 농축된 폐액을 최종적으로 처리하는 공정으로써 농축된 폐액을 더욱 농축하여 함수율을 20% 이하로 낮추게 되며 반고체 상태로 최종잔류물은 슬러지 상태로 매립처리하거나 소각하게 된다. 액상에서 고상의 농도를 높이는 과정을 통하여 고체 결정을 형성시키기 때문에 결정화라고 하며, MVR과 TVR을 접목할 수 있다.

[그림 II-14]에서 (a)의 경우, 히트펌프의 가열 자켓을 통해 가열하게 되며 (b)의 경우 자켓에 스팀을 공급하여 교반되는 농축액에 열을 간접적으로 전달하여 건조하게 된다.



(a) 히트펌프 갖춘 결정화 증발건조기

(b) 외부열원 갖춘 결정화 증발건조기

[그림 II-14] 증발건조기 예

[출처: <https://aquadest.cz>]



### Ⅲ. 폐수처리업 사업장의 사고사례



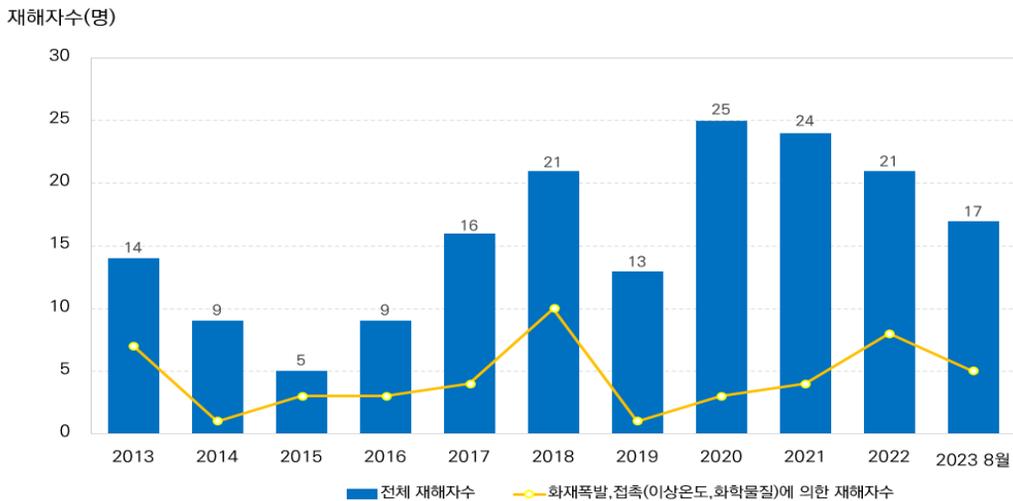


### Ⅲ. 폐수처리업 사업장의 사고사례

#### 1. 국내 폐수처리업 사업장의 사고사례

2023년 5월 기준 환경부에 폐수처리업으로 등록된 85개 사업장의 재해발생 사례를 살펴보기 위해 2013년부터 2023년 8월까지 안전보건공단 통계시스템(근로복지공단 산재요양 승인자료)에서 관련 재해사례를 수집하여 분석하였다. 재해 발생현황은 사망 16명, 부상 158명, 재해건수는 156건이다. 산재요양 승인 자료는 재해자가 발생한 경우에만 생성되기 때문에 재해자가 발생하지 않은 사고는 더 있을 것으로 추정된다.

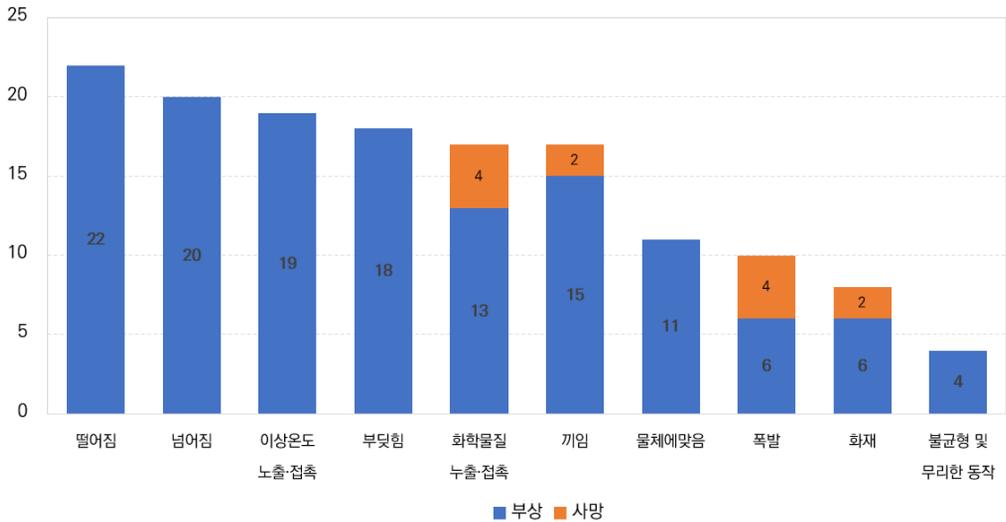
2013년도부터 연도별 재해자수는 증가와 감소를 반복하고 있으며, 2020년 폐수처리업의 안전관리강화를 위한 법령 개정 이후 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 2023년의 경우 8월까지 등록된 자료이기 때문에 추후 등록되는 승인 자료를 바탕으로 업데이트할 필요가 있다.



[그림 Ⅲ-1] 폐수처리업 사업장의 재해자수 추이

폐수처리업 사업장에서 발생한 재해 156건 중 재해자수 기준 상위 10개의 발생형태를 구분한 결과, 떨어짐, 넘어짐, 이상온도 노출·접촉<sup>1)</sup> 등의 순으로 많이 발생하였으며 전체 사망자 12명 중 화학물질 누출·접촉과 화재·폭발에 의한 사망자는 10명으로 재해특성상 다른 재해에 비해 인적피해가 큰 편이다[그림 III-2].

재해자수(명)



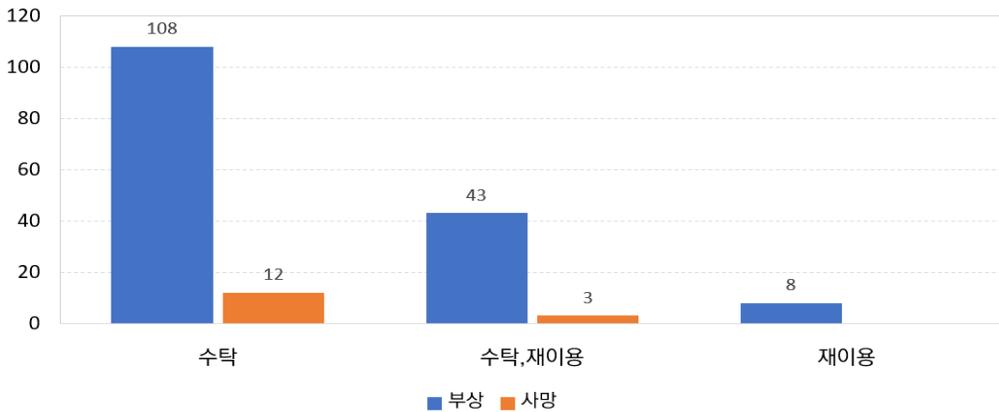
[그림 III-2] 폐수처리업 사업장의 발생형태별 재해자수

2023년 기준 환경부에 등록된 폐수처리업 85개 사업장 중 수탁처리업은 34개, 수탁·재이용업은 18개, 재이용업은 33개 업소이며, 업종별로 구분한 재해자수는 수탁 및 수탁·재이용업 사업장의 재해자수가 전체 재해자수의 95.4%(166명)에 달하는 것으로 나타났다[그림 III-3]. 또한 발생형태를 화재, 폭발, 이상온도 및 화학물질 누출·접촉으로 한정하여 업종별로 분류한 결과, 전체 54건 중 51건(94.4%)이 수탁 및 수탁·재이용업 사업장에서 발생하였다. 재이용업의 경우, 폐수를 고도처리하여 주로 금, 은, 백금 등의 귀금속 등을 회수하게 되는데 전자부품,

1) 이상온도 노출·접촉 : 고·저온의 환경 또는 물체에 노출·접촉된 경우

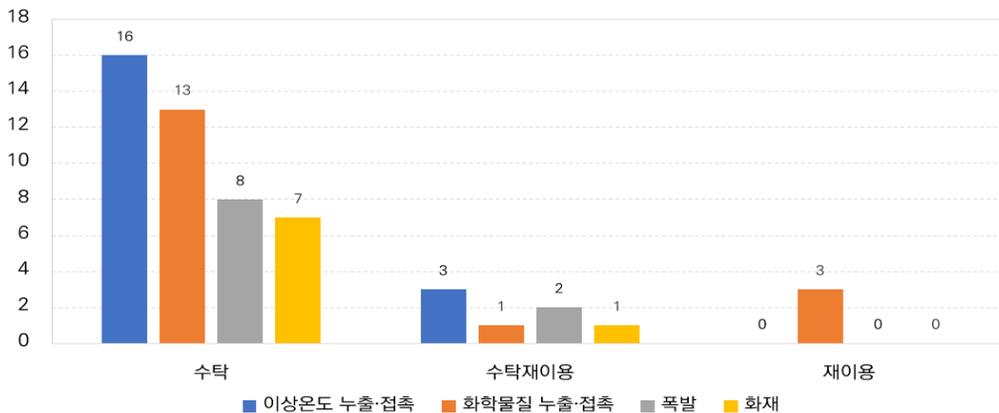
전기관련 제품, 도금 관련 사업장 등이 주요 거래처가 된다. 따라서 수탁되는 폐수 발생원이 수탁업에 비해 다양하지 않고 위수탁 계약시 폐수의 성상이 크게 달라지지 않기 때문에 폐수의 혼합위험성은 상대적으로 적을 것으로 판단된다. 수탁업은 특성상 다양한 사업장에서 배출된 폐수 내에 오염물질의 양, 구성성분 등의 변동성이 있으며, 저장조에 혼합하여 처리하는 경우가 많고, 중화 등의 전처리 공정에서 폐수 내 성분간 반응에 의해 다양한 화학물질이 생성될 수 있다.

재해자수(명)



[그림 Ⅲ-3] 폐수처리업 사업장의 업종별 재해자수

재해자수(명)



[그림 Ⅲ-4] 폐수처리업의 사업장의 발생형태별 재해자수(화학사고 한정)

〈표 III-1〉 국내 폐수처리업 사업장 화재·폭발 사고 사례('13~'23년 8월)

순번	발생년도	발생형태	재해자	재해개요
1	2013	화재	부상 2명	폐기물 보관장소에서 화재 발생
2	2013	폭발	부상 1명	폐유탱크 내 남아있던 유증기가 외부온도 상승으로 압력이 급격히 팽창하면서 폭발
3	2013	화학물질 접촉	사망 1명 부상 2명	호스가 연결된 펌프를 사용하여 폐산을 중화조로 이송작업 중 중화조에서 발생한 유독가스에 중독
4	2013	폭발	부상 1명	폐수를 운반차량에서 저장조로 이송하는 과정에서 유증기에 정전기가 발생하여 폭발
5	2014	화학물질 접촉	부상 1명	직원과 부딪혀 질산 쏟음
6	2015	이상온도 접촉	부상 1명	소각재 호퍼에 막혀있는 클링커 제거작업 중 클링커 덩어리가 일시에 배출되면서 고열의 분진이 발생
7	2015	이상온도 접촉	부상 1명	크랭크 분해작업 과정에서 미끄러져 고온의 물챔버에 빠짐
8	2015	화재	부상 1명	폐기물 보관시설에서 화재
9	2016	이상온도 접촉	부상 1명	소각재 배출 출입구 투시구 상황확인 중 발을 헛디뎠 소각재 수조에 발이 빠져 화상 입음
10	2016	화학물질 접촉	부상 1명	폐기물 창고 내에서 굴삭기가 비어있는 폐기물통을 파쇄하는 과정에서 통에 남아있던 물질(가성소다 추정)이 분출
11	2016	화재	부상 1명	조업중지 후 재가동하기 위해 순환펌프 조작 중 집수조에서 화재 발생
12	2017	이상온도 접촉	부상 2명	폐수를 배출 후 설비해체작업 중 내부에 남아있던 잔류물이 분출
13	2017	이상온도 접촉	부상 1명	물이 넘치고 있는 집수조의 위치를 인지하지 못하고 빠지면서 화상 입음
14	2017	이상온도 접촉	부상 1명	슬러지의 건조 과정에서 고온의 슬러지가 튼
15	2018	이상온도 접촉	부상 1명	회수한 금을 녹이기 위해 질산 투입 후 염산을 투입하는 과정에서 내용물과 반응을 일으켜 용액이 튼
16	2018	화학물질 접촉	사망 3명 부상 4명	폐수를 운반차량에서 집수조로 이송하는 과정에서 황화수소 누출

순번	발생년도	발생형태	재해자	재해개요
17	2018	화학물질 접촉	부상 1명	소석회 해체작업 중 작업복과 장갑 틈사이로 소석회 스며들며 화상 입음
18	2019	이상온도 접촉	부상 1명	폐수 농축액 저장탱크 파손으로 농축액 일부 누출
19	2019	화학물질 접촉	부상 1명	폐수처리설비 청소과정에서 폐수가 튼
20	2020	화학물질 접촉	부상 1명	폐수 운반차량 상차작업 중 호스에 있는 잔량을 처리하기 위해 배관 연결을 푸는 과정에서 용제가 뿜어져 나옴
21	2020	이상온도 접촉	부상 1명	보일러급수펌프 교체과정에서 볼트를 푸는 과정에서 고온의 보일러 용수가 튼
22	2021	이상온도 접촉	부상 1명	건조기 정비 도중 화상 입음
23	2021	화학물질 접촉	부상 1명	귀금속공정에서 치환작업을 위해 염산을 투입하는 중 원료물질과의 이상반응에 의해 화학약품이 튼
24	2021	화재	부상 1명	폐기물 처리를 위해 혼합반응검사 중 화재 발생
25	2021	파열	부상 1명	지게차 후진 중 폐수배관에 부딪혀 폐수가 쏟아져 나와 화상 입음
26	2021	폭발	사망 1명 부상 2명	소각로 재배출 슈트(Chute)가 막혀 뚫는 과정에서 고온의 재(약 500도)가 하부의 수조로 떨어지면서 수증기가 폭발하고 고온의 재가 비산됨
27	2022	폭발	사망 2명	폐유기용제 저장탱크 상부에서 리턴 배관 용접작업 중 탱크가 폭발
28	2022	이상온도 접촉	부상 1명	건조대에 슬러지 톤백을 걸고 내려오는 중 톤백이 터짐
29	2022	화재	사망 2명 부상 2명	선저폐수가 저장된 탱크의 상부에서 산소절단기 및 용접기 사용하여 선박을 수리하던 중 폭발
30	2022	이상온도 접촉	부상 1명	스팀 방열기를 조작하던 중 스팀호스 이탈로 화상 입음
31	2023	화학물질 접촉	부상 1명	철거공사 진행중 파이프 절단 과정에서 내부에 남아있던 황산이 비산
32	2023	폭발	사망 2명	폐수 증발농축공정에서 슬러지 배출작업 중 건조기 폭발

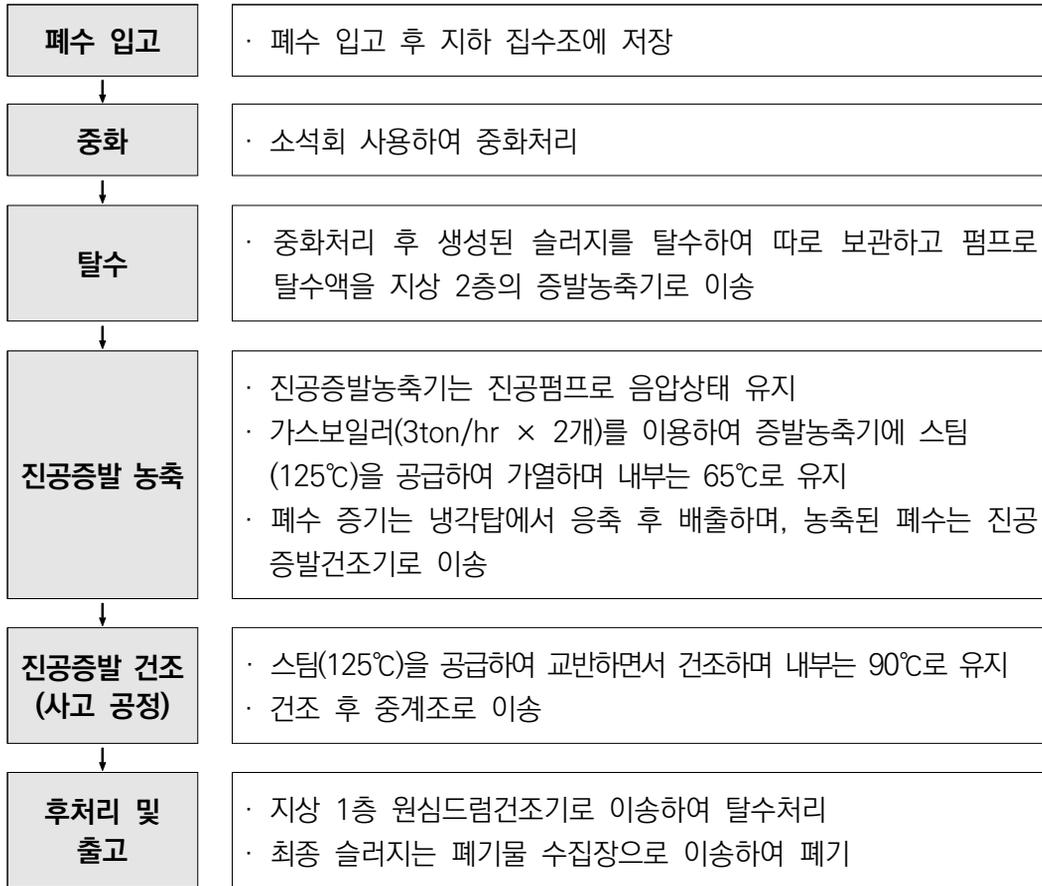
## 2. 증발농축공정 사고사례

2020년과 2023년, 각기 다른 폐수 수탁업 사업장에서 화재사고가 발생했으며, 두 사고 모두 증발농축(건조)기의 온도가 상승함에 따라 슬러지가 과건조되어 분출되면서 화재가 발생한 것으로 보고되었다. 안전보건공단의 재해조사 의견서를 참고하여 사고 경위 및 사고발생 원인 등을 정리하였다.

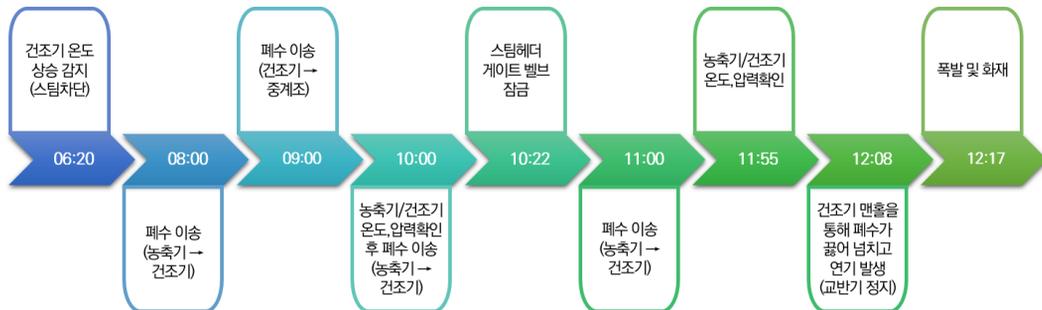
### 1) 2020년 사고사례

#### (1) 사고발생 개요 및 공정

2020년 3월 안산시 소재 폐수처리업 사업장의 폐수 증발농축(건조)공정에서 온도가 상승하면서 화재 및 폭발이 발생하여 8명의 근로자가 질식, 충격 등으로 부상을 입은 사고가 발생하였다. 사고가 발생한 공정은 다단효용증발농축기(MEE, Multi Effects Evaporator)와 진공증발건조기로 구성된 진공증발농축 공정이며 해당사업장의 폐수처리 공정 흐름을 [그림 III-5]에 나타내었다. 입고된 폐수는 산, 염기, 일반 폐수 등으로 분류하여 지하 집수조에 저장한 후, 중화조에서 중화처리 후 탈수하여 슬러지는 폐기를 위해 따로 보관하고 탈수액은 진공증발농축기로 투입된다. 증발농축기는 라인별로 3개의 열교환기와 증발농축기로 구성되어 있으며 응축기와 진공펌프가 연결되어 있다. 증발농축기에서 진공조건으로 내부온도가 65℃로 유지되며 증발된 증기는 응축기에서 냉각되어 배출되며 레벨 제어로 폐수는 자동으로 증발농축기에 공급된다. 증발농축기에서 농축된 폐수는 건조기로 보내지게 되는데 증발농축기와 마찬가지로 스팀을 공급하여 건조하게 되며, 회분식 반응기 형태로 교반한다. 건조기에서 배출되는 슬러지는 원심드럼건조기로 이송하여 탈수처리한 후 폐기처리하게 된다. 안전보건공단 경기서부지사 에서 조사한 결과를 토대로 사고 발생전후과정을 시간대별로 재구성하여 [그림 III-6]에 나타내었다.



[그림 III-5] 공정 흐름도



[그림 III-6] 사고당일 시간대별 경과



(a) 건조기 상부(폐수가 흘러넘침)



(b) 건조기 하부



(c) 사고 건조기



(d) 폭발충격으로 창문 파손

### [그림 III-7] 사고 후 현장 사진

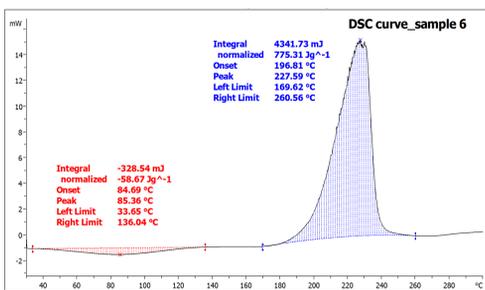
사고발생 당일 오전 6시에 작업자가 건조기의 온도상승을 감지하고 자켓의 스팀 감압밸브 이상을 우려하여 스팀을 차단하였다, 그러나 스팀헤더의 차단밸브를 잠근 후에도 11시경 확인된 건조기의 자켓 온도는 120℃를 유지하고 있었으며 이후 12시경부터 건조기 내부 폐수가 맨홀을 통해 유출되고, 고압의 가스가 배출되는 것과 같은 소리와 함께 설비가 폭발하였다. 폭발에 의한 설비 및 건물 파손상태를 [그림 III-7]에 나타내었다. 사고가 발생한 건조기 주변에는 폭발 전 내부 물질의 누출 흔적이 있었으며, 폭발이 발생하면서 압력에 의해 상부 덮개가 이탈되었다. 안전보건공단 경기서부지사의 조사결과에 따르면 건조기 파열시 유리창 파손과 비산물의 발견 위치를 근거로 사고당시 TNT 0.54kg에 해당하는 폭발위력이 발생했던 것으로 추정하였다.

(2) 사고발생 원인

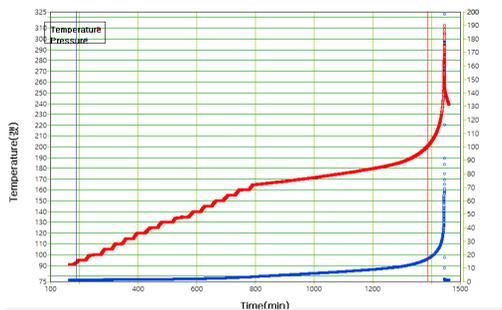
안전보건공단 경기서부지사의 재해조사 의견서에 따르면 사고발생 원인을 건조기 온도조절 실패, 입고폐수 관리 미흡, 점화원 관리 미흡 3가지로 제시하였다.

가) 건조기 온도 상승에 따른 이상반응 발생

스팀밸브는 건조기 온도를 조절하는 주요설비로써 스팀 감압밸브 이상시 설비 운전을 중단하고 즉시 점검 및 보수를 실시해야 하지만 추가적인 조치는 없었으며 이후 이상 유무를 확인하지 않은 채 건조기 운전을 지속하였다. 이로 인해 스팀 헤더 게이트밸브를 잠그기 전까지 4시간 동안 밸브 고장 등으로 인한 과압(정상운전시 2kg/cm<sup>2</sup>, 125℃)의 스팀이 공급되면서 자켓 내부에 국부적으로 정상운전온도(90℃) 이상의 온도상승이 발생하였을 것으로 추정하였다. 산업안전보건연구원 위험성시험부에서 사고당시 취급물질에 대해 DSC(시차주사열량계)와 ARC(가속 속도열량계)를 이용하여 열안정성을 평가한 결과, 약 170℃에서 분해로 인한 발열이 시작되면서 (170~261)℃ 범위에서 775J/g의 발열량을 보였으며 165℃를 초과하면서 자기발열이 시작되고 내압이 200bar인 시료용기가 파열되었다. 이 결과를 토대로 폐수 내 성분이 가열됨에 따라 폭발적인 분해반응을 일으킨 것으로 추정되었다.



(a) DSC 결과



(b) ARC 결과

[그림 Ⅲ-8] 건조 1호기 취급물질의 열안정성 분석 결과

#### 나) 입고 폐수 관리 미흡

사고당시 물환경보전법 개정에 의한 수탁폐수 간의 혼합반응 확인이 의무가 아니었기 때문에 사고가 발생한 사업장에서는 주로 육안으로 폐수 이상 유무를 파악하거나 수소이온농도(pH) 측정만 실시하였다. 혼합확인을 통한 폭발성, 자연발화성 확인은 하지 않은 것으로 추정된다.

#### 다) 점화원 관리 미흡

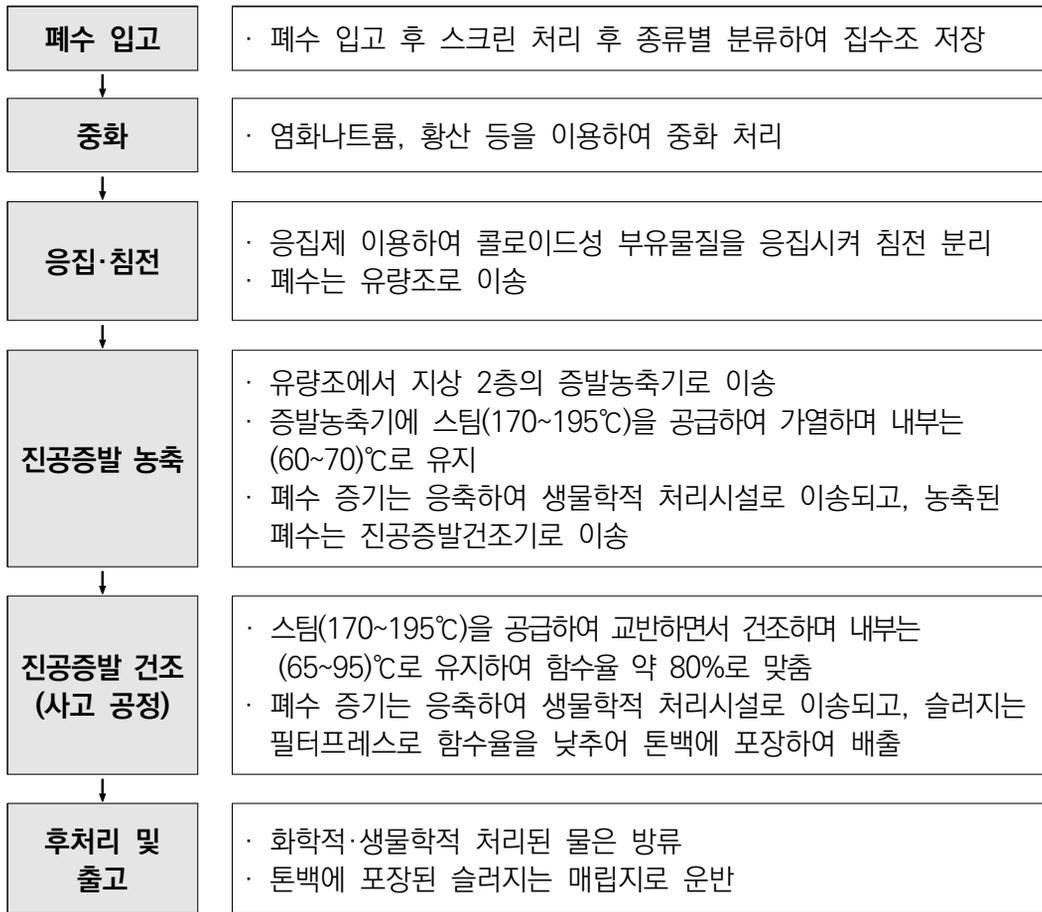
점화원은 ①반응(분해)열에 의한 발화, ②정전기 대전(배관내 폐수 유동 및 건조기내 슬러지 교반, 이상반응시 고압 분해가스 분출 등으로 전하가 축적), ③전기적 에너지(사고 전날 드럼드라이어 설치 작업 후 시운전중이었으며 사고 설비 인근에 조작반 등이 설치되어 있었음)으로 추정하였다.

## 2) 2023년 사고사례

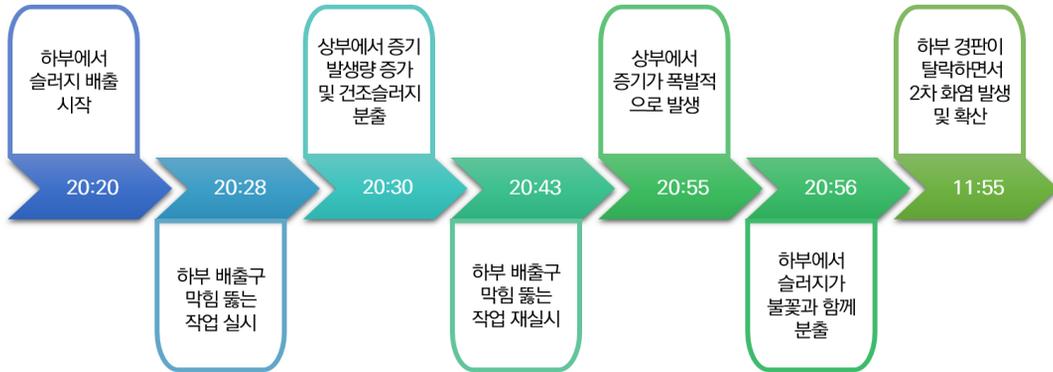
### (1) 사고발생 개요 및 공정

2023년 1월 인천시 소재 폐수처리업 사업장의 폐수 증발농축(건조)공정에서 온도가 상승하면서 화재 및 폭발이 발생하여 2명의 근로자가 사망한 사고가 발생하였다. 사고가 발생한 공정은 2020년 사고와 동일하게 다단효용증발농축기(MEE, Multi Effects Evaporator)와 진공증발건조기로 구성된 진공증발농축 공정이며 해당사업장의 폐수처리 공정 흐름을 [그림 III-9]에 나타내었다. 입고된 폐수는 스크린으로 부유물을 거른 후 종류별로 분류하여 집수조에 저장한다. 중화조에서 염화나트륨, 황산을 이용해 중화처리하고 응집제로 콜로이드성 부유 물질을 응집시켜 침전시킨 후 침전물은 슬러지로 처리되고 폐수는 증발농축기로 이송된다. 증발농축기는 라인별로 각각 3개의 열교환기와 증발농축기로 구성되어 있으며 응축기와 진공펌프가 연결되어 있다. 증발농축기에서 진공조건으로 내부 온도가 (60~70)℃로 유지되며 증발된 증기는 응축기에서 냉각되어 배출되며 레벨 제어로 폐수는 자동으로 증발농축기에 공급된다. 증발농축기에서 농축된

폐수는 건조기로 보내지게 되는데 증발농축기와 마찬가지로 스팀을 공급하여 건조하게 되며, 회분식 반응기 형태로 교반된다. 건조기에서 배출되는 슬러지는 드럼건조기 또는 필터프레스로 이송하여 탈수처리한 후 폐기처리하게 된다. 안전 보건공단에서 조사한 결과를 토대로 사고 발생전후과정을 시간대별로 재구성하여 [그림 Ⅲ-10]에 나타내었다.



[그림 Ⅲ-9] 공정 흐름도



[그림 III-10] 사고당일 시간대별 경과



(a) 사고 건조기



(b) 건조기 하부 경판



(c) 하부 경판에서 화염 분출(CCTV)



(d) 화염 확산(CCTV)

[그림 III-11] 사고 후 현장 사진

## (2) 사고발생 원인

안전보건공단 재해조사의견서에 따르면 사고발생 원인을 건조기 온도조절 실패, 안전장치 부재, 안전운전절차 및 비상대응절차 작성 미흡, 입고폐수 관리 미흡 4가지로 제시하였다.

### 가) 슬러지 배출시 스팀공급 미차단으로 건조기 온도 증가

농축폐수의 공급은 레벨계와 연동된 액츄에이터를 통해 자동 공급을 하도록 설계되어 있으나 운전일지에는 18시 이후 공급이 되지 않았다. 또한 슬러지 배출시 건조기로 공급되는 스팀공급을 차단한 후 작업을 해야 하지만 스팀밸브를 차단하지 않은 상태에서 약 55분간 고온의 스팀이 공급되었다. 이로 인해 슬러지가 과건조되면서 교반기가 정상적으로 작동하지 못하였고, 국부적으로 열축적이 되면서 분해반응이 시작되고 임계점에 도달하면서 폭발적인 반응이 진행된 것으로 추정하였다.

### 나) 설비의 정상운전범위 이탈에 대비한 안전장치 부재

슬러지의 과건조, 설비 압력방출 등 이상온도 및 압력발생과 같은 설비의 정상 운전범위가 이탈되었음에도 온도, 압력계와 연동된 경보장치 및 냉각용수 공급 등의 긴급냉각장치와 같은 안전장치가 미설치되어 초기 대응이 불가능하였다.

### 다) 안전운전절차 및 비상대응절차 작성 미흡

제조사가 제공한 안전운전절차(운전매뉴얼)에는 정전상황 및 모터 트립 등 이상상태에 대한 범위가 한정적으로 나와 있음에도 불구하고 추가적인 검토 및 수정 없이 사용하고 있었으며, 이상온도 및 압력 발생에 따른 화재·폭발 관련한 안전운전 및 비상대응절차의 내용이 누락되었다.

### 라) 입고 폐수 관리 미흡

물환경보전법에 따라 폐수 입고시 수탁폐수간 혼합반응을 확인해야 하지만 CCTV확인 결과, 자연발화성 등의 확인에 필요한 충분한 반응시간을 지키지 않은 것으로 추정됨에 따라 일정 온도 이상에서 폭발적인 분해를 일으킬 수 있는 물질 등을 사전에 제한하지 못하고 입고했을 가능성이 있다.

### 3) 2020년과 2023년 사고사례 비교

2020년과 2023년에 발생한 증발농축공정 화재·폭발사고는 사고원인이 정상 운전조건을 이탈한 건조기 온도상승으로 슬러지의 분해반응에 기인한 발화로 동일했다. 산업폐수의 경우 발생원에 따라 고농도, 저농도, 유해물질 함유 여부, 무기성 등을 구분하여 오염물질별로 적절한 폐수처리방법을 선택하여야 하나 수탁폐수업의 경우 고농도/저농도, 산/염기/일반, 처리방법별 등으로 구분하고 정해진 공정에 따라 처리하기 때문에 폐수의 성상에 따른 유연한 처리가 불가능하다. 따라서 유사사고를 방지하기 위해서는 폐수 수탁업 사업장의 안전관리에 대한 근본적인 대책이 필요함을 알 수 있었다.

〈표 III-2〉 증발농축공정 사고 2020년·2023년 비교

2020년	구분	2023년
진공증발건조기	사고설비	진공증발건조기
운전용량 8.5m³ 운전온도 90℃ 열원 130℃ 스팀	건조기 제원	운전용량 6m³ 운전온도 (65~95)℃ 열원 (170~195)℃ 스팀
건조기 온도상승*으로 열이 축적되고 슬러지 분해온도에 도달하면서 연소 진행 * 스팀 감압 및 차단 밸브 이상	발화 원인 (추정)	건조기 온도상승*으로 열이 축적되고 슬러지 분해온도에 도달하면서 연소 진행 * 스팀공급 미차단 및 농축폐수 미공급
부상 8명	재해자	사망 2명

# IV. 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가



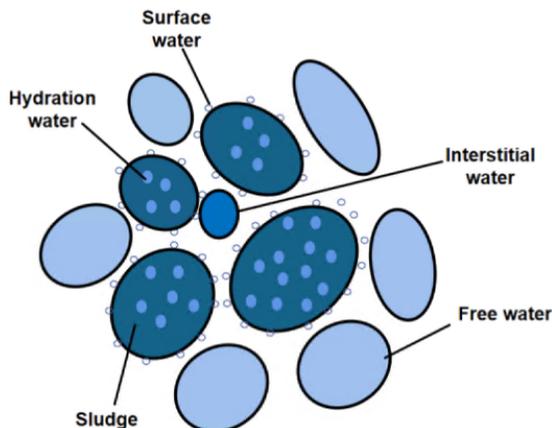


## IV. 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가

### 1. 폐수 슬러지의 특성 및 처리

“슬러지”란 하수 또는 폐수의 처리 과정에서 부산물로 생성된 부유물질이 가라앉아 생긴 침전물을 말하며, 수분 함량이 높으면 부피가 증가하여 운송, 처리 및 폐기와 관련된 비용이 증가함에 따라 처리 및 최종 폐기 전에 수분을 줄이는 것이 매우 중요하다. 폐수 슬러지는 처리과정에 따라 차이가 있으나 통상적으로 90% 이상의 함수율을 가지고 있으며, (40~60)%의 함수율 구간에서는 점성이 증가되어 덩어리로 뭉쳐지며, (10~30)%에서는 입자상태가 된다.

슬러지 내 수분은 다양한 형태로 존재하며, 자유수(free water), 간격수(interstitial water), 표면수(surface water), 수화수(hydration 또는 internal) 4가지로 분류할 수 있다(Lin, 2022) [그림 IV-1]. 간격수, 표면수, 수화수를 결합수(bound water)라고 한다.



[그림 IV-1] 슬러지 수분의 분류

자유수는 고체 또는 플록<sup>1)</sup>(floc)의 영향을 받지 않기 때문에 농축과 탈수 등의 기계적 처리를 통해 분리될 수 있으며 전체 수분의 약 70%를 차지한다. 간격수는 슬러지 플록 사이의 모세관력에 의해 결합되거나 플록의 틈새에 갇혀 있는 수분을 말하며, 플록이 조각화될 때 방출될 수 있다. 일부 간격수는 원심분리와 같은 강한 기계적 힘에 의해 제거될 수 있다. 표면수는 흡착(adsorption)과 점착(adhesion)에 의해 고체입자 표면과 결합되어 있으며 수화수는 고체 입자에 단단하게 결합되어 있어 기계적 방법에 의해 제거할 수 없다. 수화수의 경우 입자를 파괴하고 물을 증기로 추출하는 열적 건조방법을 통해 제거하게 된다.

폐수처리 중 생성된 슬러지를 처리하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법으로는 농축(thickening), 탈수(dewatering), 건조(drying)가 있다. 농축은 슬러지에서 자유수 일부를 제거하는 공정으로 건조 고형분(DS) 함량이 (4~6)% 증가하게 되며 중력식 농축, 부상식 농축, 원심분리 농축, 중력식 벨트 농축, 회전 드럼 농축 등의 방법이 있다. 탈수는 고형분(DS) 함량이 (15~45)%로 더 많은 수분을 제거하게 되기 위해 기계적 힘을 가하게 되며, 필터 프레스, 벨트 프레스, 스크류 프레스, 원심분리 등이 있다. 건조는 슬러지에 열에너지를 공급하여 물을 증발시키는 방법으로 크게 대류 건조, 전도 건조, 태양 건조의 세가지 방식으로 나눌 수 있다.

1) 생물학적 및 유기고분자 물질(응집제 등)에 의해 결합되어 형성된 고형물질

## 2. 평가대상 물질

폐수수탁업 사업장의 안전관리 실태를 조사하기 위해 방문한 사업장 중 4개 사업장에서 증발건조기를 거쳐 톤백에 담겨 탈수 및 보관하는 과정에서 채취한 슬러지 시료 4개와 2023년에 사고가 발생한 사업장에서 증발건조기에 투입되기 직전의 폐수 시료 1개에 대해 화재·폭발 특성을 평가하였다. 증발건조기를 거친 슬러지는 물이 다량 포함되어 있어 수분 증발에 의한 흡열 영향을 배제하고 사고당시 건조기 온도 증가에 따른 슬러지의 과건조를 가정하여 107℃에서 1시간 건조하였으며, 100℃ 이상의 고비점물질에 의한 점성을 제거하고자 200℃에서 3시간 건조하여 장비별 적용가능 한 시료를 사용하여 평가하였다.

B 사업장 시료의 경우 200℃ 건조 후에도 점성의 반고체 상태가 되었다. 일반적으로 슬러지의 점도는 건조도와 유기물 함량에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 생물학적 처리를 거치는 경우 미생물이 간혀 있는 긴 생체고분자(예 : 세포외 고분자물질-EPS<sup>2)</sup>)의 매트릭스인 활성슬러지로 인한 것으로 볼 수 있으며, 탈수 및 건조 과정에서 접착성 바이오고분자는 점점 더 농축되고 끈적한 혼합물이 되는 것으로 알려져 있다.

〈표 IV-1〉 시료별 채취장소

사업장	시료 채취장소
A	증발건조기 벽면에서 긁어냄
B	증발건조 후 소각하기 위해 탈수처리중인 톤백에서 채취
C	증발건조 후 소각하기 위해 탈수처리중인 톤백에서 채취
D	증발건조 후 소각하기 위해 탈수처리중인 톤백에서 채취
E	2023년 사고발생 사업장의 건조기 투입 전 폐수(수용액 상태)

2) EPS: Extracellular Polymeric Substances

〈표 IV-2〉 시료별 수분 및 고형분 함량

사업장	수분함량(107℃ 건조)	고형분 함량(200℃ 건조)
A	26%	24%
B	42%	45%
C	31%	25%
D	9%	23%
E	86%	4%

〈표 IV-3〉 평가대상 물질 목록

사업장	시료 번호	시료성상	평가항목
A	A-1	슬러지(녹색)	TGA
	A-2	고형 덩어리(녹갈색)	DSC, ARC
	A-3	고형 덩어리(부스러짐)	입도분석, DSC, 마찰감도, 분진폭발
B	B-1	슬러지(검정색)	TGA
	B-2	점성의 반고체(검정색)	DSC, ARC
	B-3	점성의 고체(검정색)	DSC, 마찰감도
C	C-1	슬러지(검정색)	TGA
	C-2	고형 덩어리(녹색)	DSC, ARC
	C-3	고형 덩어리(부스러짐)	DSC, 마찰감도, 입도분석, 분진폭발
D	D-1	점성의 반고체(검정색)	TGA
	D-2	고형 덩어리(검정색)	DSC, ARC
	D-3	고형 덩어리(부스러짐)	DSC, 마찰감도, 입도분석, 분진폭발
E	E-1	폐수(검정색)	TGA
	E-2	점성의 고체(검정색)	DSC, ARC
	E-3	고형 덩어리(부스러짐)	DSC, 마찰감도, 입도분석, 분진폭발

※ 전처리

- A, B, C, D, E-2는 1 시료에 대해 오븐에서 107℃에서 1시간 건조처리
- A, B, C, D, E-3는 1 시료에 대해 오븐에서 200℃에서 3시간 건조처리

〈표 IV-4〉 시료 사진

사업장	1	2	3
A			
B			
C			
D			
E			

1번 : 사업장에서 채취한 시료

2번 : 1번 시료에 대해 오븐에서 107℃에서 1시간 건조처리

3번 : 1번 시료에 대해 오븐에서 200℃에서 3시간 건조처리

### 3. 평가 장비

폐수 증발농축공정에서 발생한 슬러지에 대한 화재·폭발 특성을 평가하고자 다양한 장비를 이용하여 시험을 수행하였으며, 평가항목을 <표 IV-5>에 나타내었다.

<표 IV-5> 화재·폭발특성 평가항목

평가항목	평가내용
입도분석	레이저 회절/산란법에 의한 건식입도분석으로 고체시료의 평균 입자크기 및 분포 측정
시차주사열량계(DSC)	온도에 따른 발열개시온도 및 발열량 등 열안정성 변화 측정
열중량분석(TGA)	온도에 따른 질량변화 및 휘발성 가스 발생 여부 측정
마찰감도시험	화약류 성능시험에 의해 마찰에 대한 화학물질의 감도를 평가
분진폭발시험	부유분진의 폭발여부 및 폭발강도 등을 평가
유도결합플라즈마 분광분석기(ICP-OES)	무기원소의 정성 및 정량 분석

#### 1) 입도분석기

분진의 입도분포는 폭발강도나 점화민감도 등의 분진폭발특성에 큰 영향을 미치는 주요인자로서 분진의 화재·폭발 위험성 평가에 있어서 기본적으로 측정되어야 한다. 일반적으로 입자크기가 작을수록 부유하기 쉽고, 표면적이 커짐에 따라 폭발성이 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 레이저 회절법 원리를 이용한 건식방식의 입도분석기를 사용하여 입도분포를 측정하였다.

입도분석기는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(powder) 상태의 시료에 대하여 입자크기 및 분포를 측정하는 분석 장비이다. 상업적으로 생산되어 사용하고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser

scattering) 등 크게 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자 하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 방법이다. 본 시험에 사용된 시험장비 LS 13320은 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 건식 방식으로 시료를 투입한다. 광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 측정하여 입자 크기 및 분포를 측정하는 방법이다. 시료를 투입하여 적절한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저가 투사되면 이 레이저는 입자에 의해 표면에서 산란되게 되고, 수십개의 검출기(각각의 검출기는 고유의 각도값을 가짐)가 산란되는 레이저의 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기 및 분포를 측정하게 된다.

### (1) 평가장비

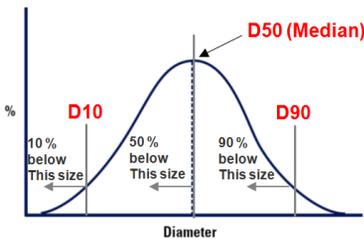
본 시험장비는 ISO 13320-1의 Laser Scattering Method에 적합하도록 설계되었으며 건식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다. Beckman Coulter (모델명 Beckman Coulter LS 13320)에서 제작한 시험장비로 [그림 IV-2]에 나타내었으며, 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 시료투입부로 구성되어 있다.



[그림 IV-2] 입도분석기

## (2) 평가방법

KS A ISO 11357-1(입자 크기 분석-레이저 회절법-제1부) 시험규격에 의해 평가되며, 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 투입하여 측정한다. 시험결과는 입자를 구형으로 가정하여 입자크기(D10, D50, D90)를 산출하며, 입도분포의 정의를 [그림 IV-3]에 나타내었다.



D10 : 전체 분포상에서 10%일 때의 입도  
 D50 : 전체 분포상에서 50%일 때의 입도  
 D90 : 전체 분포상에서 90%일 때의 입도

[그림 IV-3] D10, D50, D90의 입도분포 정의

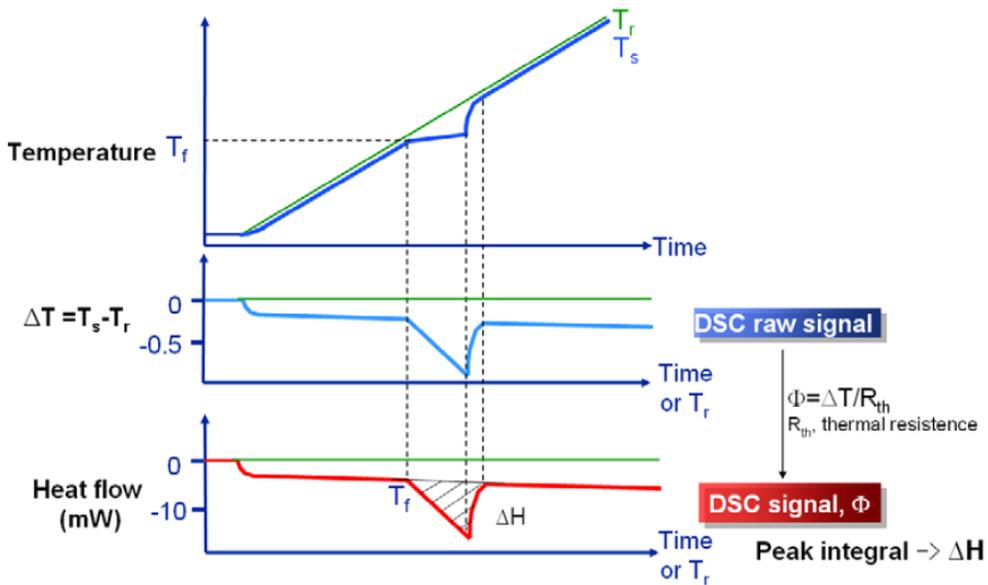
## 2) 시차주사열량계(DSC)

열분석이란 물질의 물리적 변수(Physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 분석 방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시키기에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이 때 어떤 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 IV-6>과 같다. 본 시험 평가에서는 DSC를 이용한 열분석을 실시하였다.

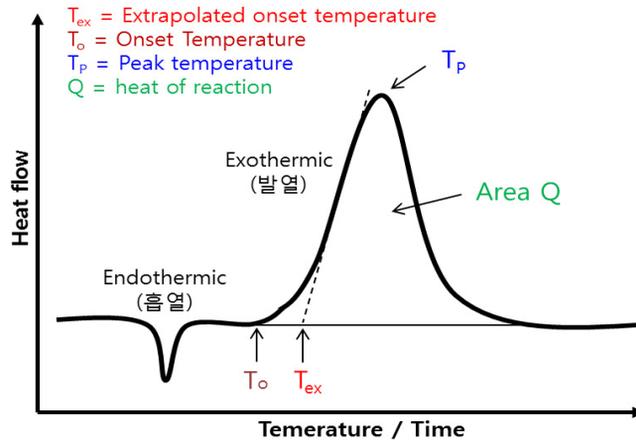
<표 IV-6> 열분석 방법

측정법	관측량	기호	단위
DTA(Differential thermal analysis)	온도차	$\Delta T$	K
DSC(Differential scanning calorimeter)	열유속	$\Delta q$	Joule/s=Watt
TGA(Thermo gravimetric analysis)	중량	g(%)	g
TMA(Thermo mechanical analysis)	길이	$\Delta L$ (%)	m

DSC는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속 차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W; Watt)나 밀리وات트(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW·s나 mJ로 나타낸다. 열에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상당하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에너지를 방출하면 발열(Exothermic)이라 한다. DSC는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적 거동에 대한 다양한 정보를 제공하며 비열, 열적 효과, 유리전이(Glass transition), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다. 수밀리그램 정도의 시료로 발열량과 발열개시온도 등을 측정할 수 있기 때문에 화학물질의 열적 위험성을 예측하는 예비 시험으로 매우 유용하다.



[그림 IV-4] DSC 측정 원리



- \* Endothermic : 시료가 에너지를 흡수할 때 엔탈피 변화는 흡열이며, 용융, 증발과 같은 변화가 이에 해당함
- \* Exothermic : 시료가 에너지를 방출할 때 엔탈피 변화는 발열이며, 산화, 산화분해, 결정화와 같은 변화가 이에 해당함

[그림 IV-5] DSC 열유속 예시

### (1) 평가장비

열분석 시험에 사용된 DSC는 스위스의 METTLER TOLEDO(모델명 DSC1)에서 제작한 장비로 [그림 IV-6]에 나타내었다. DSC는 시료가 담긴 crucible(pan)과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, 시료가 담긴 crucible을 자동으로 cell에 투입해주는 sample robot, (-90~30)℃ 의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있으며 measuring cell의 사양을 <표 IV-7>에 나타내었다.



(a) 시차주사열량계(DSC)



(b) aluminum pan



(c) DSC sensor

[그림 IV-6] DSC 장비

〈표 IV-7〉 DSC measuring cell 사양

항목	사양
온도 범위	(-50~700)°C
온도 정밀도	±0.2K
가열 속도	(0.02~300)K/min
Calorimetric resolution	0.04μW

DSC는 유기 화합물 및 고분자 등에 적용할 수 있으며, 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은 100μl 이하로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과와의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

## (2) 평가방법

DSC의 시료용기는 알루미늄 재질의 standard pan(40μl)을 사용하였으며 시료를 넣은 후, piercing kit를 이용하여 직경 (50~100)μm의 핀홀(pinhole)을

만들어 내부압력과 외부압력을 평형화시킨 개방형 조건을 사용하였다. 시료량은 (2~3)mg, 10℃/min의 승온속도로 (30~600)℃의 온도범위, 공기분위기에서 평가를 실시하였다.

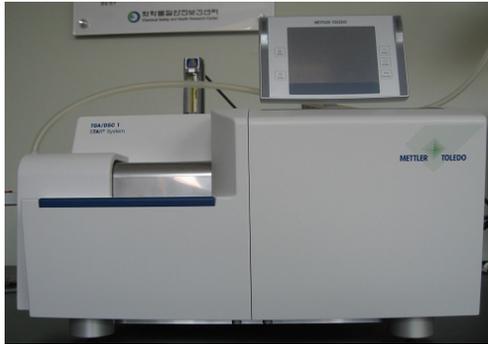
시료가 반응성이 큰 경우 시료의 용기를 담는 pan의 선택이 매우 중요하며 밀폐형(통상적인 개방형이 아닌) pan의 경우 자가촉매 효과나 시료내 증발 또는 분해물질에 의한 가압효과를 유발할 수 있으며, 개방된 pan의 경우 물질의 증발 등으로 인해 열손실 등을 유발하여 실제 반응열보다 작게 나올 수 있다.

### 3) 열중량분석기(TGA)

열중량분석기(TGA, Thermo Gravimetric Analysis)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 시료의 질량변화는 증발(vaporization)이나 가스를 생성하는 화학반응(Chemical reaction) 등에 의해 발생하게 되며, microbalance에 의해 연속적으로 측정된다. TGA에 의한 질량-온도 곡선을 이용해 온도변화에 따른 질소, 산소, 공기 등의 분위기하에서 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 시료의 열안정성 및 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성 비율 등을 알 수 있다.

#### (1) 평가장비

열중량분석기는 스위스의 METTLER TOLEDO에서 제작한 시험장비(모델명 TGA/DSC1)로 [그림 IV-7]에 나타내었다. TGA는 Furnace(가열로), 저울, 시료의 온도를 측정할 수 있는 TGA sensor로 구성된 본체 module과 (-28~150)℃의 작동범위를 갖는 circulator, 휘발된 가스를 정성분석하는 Mass spectrometer로 구성되어 있고 사양은 <표 IV-8>과 같다.



(a) 열중량분석기(TGA)



(b) alumina crucible



(c) TGA/SDTA 센서

[그림 IV-7] TGA 장비

<표 IV-8> TGA 사양

항목	사양
온도 범위	(실온~1,100)°C
온도 정밀도	±0.25K
저울 측정 범위	≤1g
Balance resolution	0.1μg
Calorimetric resolution	0.5mW
Sample volume	100μl

TGA는 산소가 결합하는 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 온도증가에 따른 무게변화가 일어나는 물질에 적용할 수 있으며 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 100 μl로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

## (2) 평가방법

시료물질의 양을 약 (5~6)mg을 분취하여 alumina(Aluminum oxide) 재질의 open pan에 시료를 담아 저울에 올려놓은 후, 공기 및 질소분위기하(유량

50m/min)에서 10℃/min의 승온속도로 (30~800)℃의 온도범위에서 측정하였다.

#### 4) 가속속도열량계(ARC)

가속속도열량계는 1970년대 다우케미칼(Dow Chemical)사에 의해서 개발된 열량계의 한 종류로 앞서 살펴본 열중량분석기와 같은 비단열 열량계와 달리 폭주반응 등을 상정한 가혹조건(단열)에서 화학물질의 잠재적 위험성을 평가하기 위해서 사용한다. 결과물로는 단열조건에서 평가되는 물질의 발열개시온도, 시간에 따른 온도변화, 시간 및 온도에 따른 압력변화, self heating rate, TMR (Time to Maximum Rate) 등을 측정할 수 있다.

##### (1) 평가장비

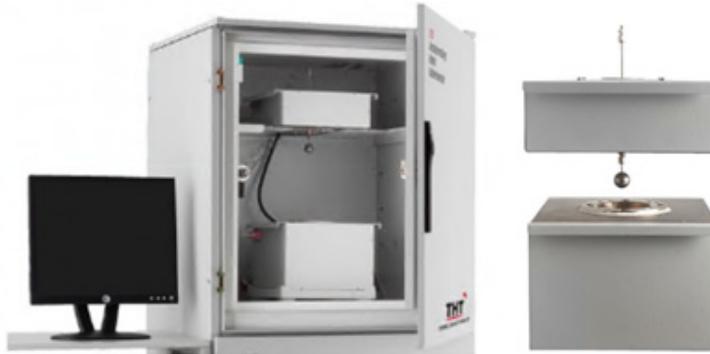
가속속도열량계는 영국의 THT(Thermal Hazard Technology)에서 제작한 시험장비로 [그림 IV-8]에 나타내었다. 시료를 담는 용기(bomb)을 장착하고 단열조건을 형성하는 가열로와 이를 조절하는 control box와 DAQ(data aquisition) system으로 구성되어 있으며, 온도는 (상온~600)℃, 압력 (0~200) bar의 작동범위를 가지며 감도는 0.02℃/min exotherm onset detection이다.

##### (2) 평가방법

10ml 용량의 bomb에 투입된 시료를 목적 온도구간에서 일정한 속도로 가열하면서 시료의 열적 안정성을 평가한다. 시료는 사전에 설정된 발열개시가 탐색될 때까지 지속적으로 『가열(heat)-유지(wait)-탐색(search)』을 반복하는데, 일단 발열개시가 관측되면 더 이상의 외부가열을 멈추고 내부 발열에 의한 온도상승을 따라가면서(단열조건 유지) 시간에 따른 내부 온도 및 압력의 변화를 측정한다. <표 IV-9>는 본 평가에서 사용한가속속도열량계의 실험조건을 요약하여 나타낸 것이다.

〈표 IV-9〉 가속속도열량계(ARC) 실험조건

구분	실험조건
bomb 재질	Hastelloy (10ml)
온도범위	(100~350)°C
작동모드	heat-wait-see, ramping
승온속도	5°C
열감지 감도	0.02°C/min
대기시간	15min



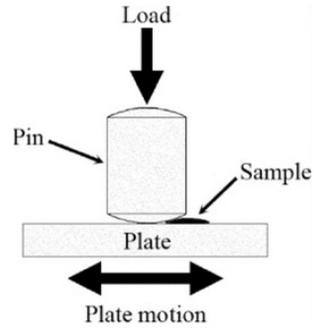
[그림 IV-8] ARC 장비

### 5) 마찰감도시험기

마찰감도는 시험기에 부착한 자기(porcelain제)의 마찰봉과 마찰판 사이에 끼워서 하중을 건 상태에서 마찰 운동을 시켜 그 하중과 폭발 상태의 관계에서 마찰에 대한 화학물질의 감도를 조사하여 시험된 형태로서 해당 물질이 가지는 운송 또는 보관상의 위험성을 판단하는데 이용한다.

#### (1) 평가장비

마찰감도시험기는 독일의 R&P(Reichel & Partner)에서 제작한 시험장비(장비명 : BAM friction tester)로 [그림 IV-9]에, 장비구성은 〈표 IV-10〉에 나타내었다.



[그림 IV-9] 마찰감도시험기

<표 IV-10> 마찰감도 시험기 장비 구성

구분	내용
friction tester	두개의 가이드로 움직이는 운반대에 위치, 운반대는 전기모터, 연결 막대, 기어장치가 연결되고, 판은 봉의 10 mm 아래에서 앞뒤로 움직여 마찰 부하를 줄 수 있도록 구성
자기제 판(plate) 자기제 핀(pin)	평탄형의 판(25×15×5mm)와 봉(지름 10mm, 길이 15mm)은 공업용 자기제로 만들어졌으며, 각 표면은 1회씩 사용
추	인가되는 마찰에너지에 따라 9종류의 추를 사용하며 다양한 높이의 눈치에 걸어 마찰에너지를 다양하게 설정 가능하며, 추의 무게와 위치에 따른 하중 관계는 <표 IV-11> 참조

〈표 IV-11〉 추와 하중(N)의 관계

추번호	추위치					
	I	II	III	IV	V	VI
1	4.9	5.9	6.9	7.8	8.8	9.8
2	9.8	11.8	13.7	15.7	17.7	19.6
3	19.6	23.5	27.5	31.4	35.3	39.2
4	29.4	35.3	41.2	47.1	53	58.8
5	39.2	47.1	54.9	62.8	70.6	78.5
6	58.8	70.6	82.4	94.1	105.9	117.7
7	78.5	94.1	109.8	125.5	141.2	156.9
8	117.7	141.2	164.8	188.3	211.8	235.4
9	176.5	211.8	247.1	282.4	317.7	353

(2) 평가방법

마찰감도시험은 KS M 4802-4.2.3 (화약류 성능 시험방법-마찰감도 시험) 규격에 의거하여 수행하였으며 시험절차는 다음과 같다.

- 충분히 건조된 깨끗한 마찰봉과 마찰판을 사용하여 마찰판 표면의 줄무늬가 받침대의 이동 방향과 직각이 되도록 고정한다.
- 마찰봉을 척으로 고정, 마찰봉과 판 사이에 시료를 끼우고, 가로대에 추를 장착한다.
- 분말 시료를 봉과 판이 접촉하는 점에 대하여 전후로 1:2의 비율이 되도록 위치하도록 한다.
- 추 및 추의 위치에 따라 하중을 건 상태에서 마찰판을 왕복 운동시켜 폭발 상태를 조사하며, 초기 최대하중(360 N)에서 시작하여 6회 시험 중 1회만 폭발한다고 추정되는 하중 범위를 결정하여 1/6폭점 결정한다.
- 폭발·불폭발 판정은 〈표 IV-12〉에 따르며, 마찰감도 등급은 〈표 IV-13〉에 따른다.

〈표 IV-12〉 마찰감도 폭발/불폭발 판정기준

구분	내용
폭발	폭음 : 폭음을 발생한다
	발화, 발연 : 폭음을 들 수 없으나 불꽃 또는 연기가 보인다
불폭발	부분변화 : 시료가 용융 또는 변색하지만 폭음, 불꽃, 연기 등을 볼 수 없다
	무반응 : 폭음, 불꽃, 연기를 내지 않고 시료에 변화가 보이지 않는다

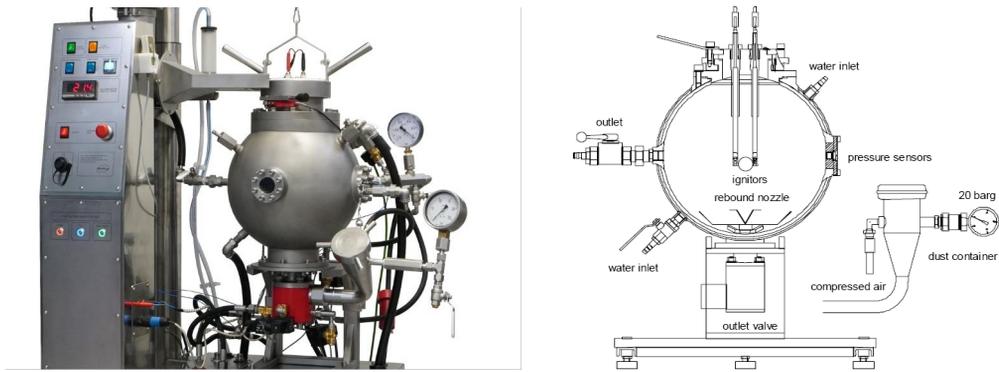
〈표 IV-13〉 마찰감도 등급표

마찰감도 등급	1/6 폭발점(N)
1급	9.8 미만
2급	9.8 이상 ~ 19.6 미만
3급	19.6 이상 ~ 39.2 미만
4급	39.2 이상 ~ 78.5 미만
5급	78.5 이상 ~ 156.9 미만
6급	156.9 이상 ~ 353.0 미만
7급	353.0 이상 ~

## 6) 분진폭발시험장비

분진폭발의 가능성 및 폭발위력은 동일한 화학적 조성을 갖는 물질이라 할지라도 입자크기 및 입도분포와 같은 분진의 물리적형상과 수분을 포함하여 분진 내에 포함된 다른 가연성 물질의 종류 및 양에 따라서 달라질 수 있다. 따라서 분진에 의한 폭발위험성을 정확하게 평가하기 위해서는 평가대상 공정에서 취급하는 분진을 직접적인 대상으로 하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 부유분진의 폭발가능성 및 그 위력은 특별하게 설계된 시험 장치에 의해서 평가될 수 있는데, 대표적으로 20-L Apparatus를 들 수 있다. 20L 장치는 분진폭발의 위력을 평가하기 위한 설비로써 시험결과를 통해서 분진운의 최대폭발압력

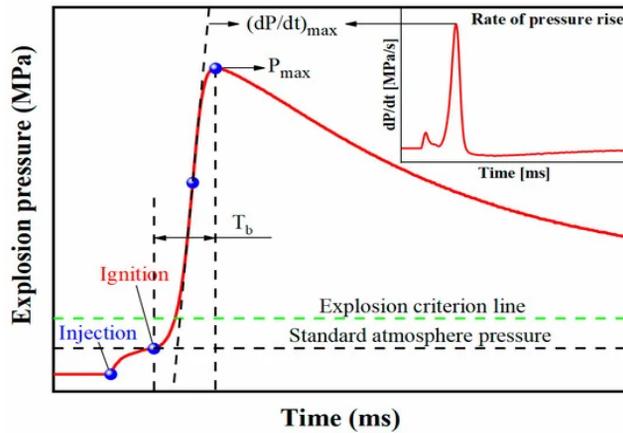
( $P_{max}$ ), 최대폭발압력상승속도( $(dp/dt)_{max}$ ) 및 폭발하한계(LEL<sub>dust</sub>)를 측정할 수 있다. 본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20L의 구형 용기로 측정하는 장비이다[그림 IV-10]. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 분진 폭발성(Dust explosibility), 폭발하한계(Low explosion limit, LEL), 최대폭발압력(Maximum explosion overpressure,  $P_{max}$ ), 최대폭발계수(Maximum explosion constant,  $K_{max}$ ), 분진폭발지수(Dust explosion index,  $K_{st}$ ), 한계산소농도(Limiting oxygen concentration, LOC) 등이다.



[그림 IV-10] 분진폭발시험장비(20-L Sphere Apparatus)

분진 분사압력, 점화지연시간(일반적으로 60ms로 설정)은 시험항목에 따라 설정할 수 있으며, 분진폭발을 위한 점화원으로는 화학점화기(Chemical ignitor)를 사용한다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 시험조건을 유지할 수 있도록 별도의 온도조절장치를 사용하여야 한다. 분진폭발은 입자의 연소에 의해 화염이 전파하여 일정 이상의 압력이 발생하였을 때를 말하는데 이 때 발생하는 폭발압력( $P_m$ )의 최대값이 분진최대폭발압력( $P_{max}$ )이며, 폭발압력의 시간변화에 대한 최대값은 최대폭발압력상승속도  $[(dp/dt)_{max}]$ 가 된다. 이러한 폭발특성값은 동일한 화학적 조성을 갖는 물질이라고 하더라도 입경, 농도, 온도, 압력 등의 조건에 따라 변할 수 있다. 밀폐공간 내의 분진 폭발특성에 대한 실험적인 연구결과에 의하면, 최대폭발압력은 측정용

기의 부피가 20L 이상인 경우 폭발 용기의 부피에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 알려져 있다. 이는 해당분진이 폭발 시 발생시킬 수 있는 최대압력은 폭발이 이루어지는 용기의 부피가 20L 이상이라면 항상 일정한 값이 측정되어 진다는 것을 의미하는 것으로 이를 바탕으로 시험 효율성을 위해 20L 시험장치가 국제적으로 권장되고 있다. [그림 IV-11]은 분진폭발시험을 통해 나타나는 시간에 따른 폭발 압력의 변화이다.



[그림 IV-11] 폭발 압력 시간 그래프

(1) 평가장비

분진폭발시험장비는 폴란드의 ANKO에서 제작한 시험장비(모델명 SPD-2.3)로 사양을 <표 IV-14>에 나타내었다.

<표 IV-14> 분진폭발시험장비 사양

항목	사양
재질	stainless steel
최대압력	40bar maximum
측정범위	① Pmax : (0~25)bar    ② (dp/dt)max : > 4000bar/s ③ Kst : >1000bar·m/s    ④ LOC : 1~21%O <sub>2</sub>

## (2) 평가방법

일정 농도의 분진을 6 리터의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20bar의 공기를 불어 넣어 분진 컨테이너에서 혼합시키고, 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 20리터의 구형 용기 내에 부유분산시킨 후에, 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기를 폭발시킨다. 점화기의 폭발 후에는 해당 농도에서의 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시에 발생하는 압력을 관찰하고 분진폭발에 따른 최대압력상승속도와 최대압력을 측정하는 방식이다. 화학점화기는 최대폭발 압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10kJ을, 폭발하한계 측정 시에는 2kJ을 사용하며, 점화지연시간은 60ms로 설정한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 시험을 통하여 폭발성, 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한계 등의 폭발 파라미터를 측정한다. 분진폭발특성 시험에 적용되는 국제시험규격은 <표 IV-15>와 같다.

**<표 IV-15> 분진폭발시험에 적용된 규격**

시험항목	시험규격
$P_{max}$	EN 14034-1 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1 : Determination of the maximum explosion pressure $P_{max}$ of dust clouds
$(dP/dt)_{max}$	EN 14034-2 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 2 : Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dP/dt)_{max}$ of dust clouds
LEL	EN 14034-3 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 3 : Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds

## 4. 평가 결과

### 1) 입도분석 및 분진폭발시험

분진의 입도분포는 폭발강도나 점화민감도 등의 분진폭발특성에 큰 영향을 미치는 주요인자로서 분진의 화재·폭발 위험성 평가에 있어서 기본적으로 측정되어야 한다.

본 연구에서는 슬러지 및 폐수 시료에 대해 200℃에서 3시간 건조하여 막자 사발에서 분쇄한 후, 큰 입자를 제거하기 위해 체눈(sieve aperture) 크기가 0.075mm인 체를 통과한 시료에 대해서만 입도분석 및 분진폭발시험을 실시하였다. B사업장의 시료는 200℃ 건조처리 후에도 점성의 반고체상태로 측정이 불가하여 제외하였다.

#### (1) 입도분석

체적(Volume equivalent sphere diameter)에 따른 분진의 입도분석 결과는 <표 IV-16>과 같다. 입도분석 결과, (1.6~1.7) $\mu\text{m}$  부근을 중심으로 양측에 피크를 가지는 이산형 분포(bimodal distribution)을 보인다. 중간값은 체적 기준의 누적 도수 분포가 50%를 나타낼 때의 입자 지름(직경) D50으로 A-3은 1.3 $\mu\text{m}$ , C-3은 1.7 $\mu\text{m}$ , D-3은 1.3 $\mu\text{m}$ , E-3은 1.5 $\mu\text{m}$ 의 값을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 분진폭발과 관련된 입도의 평가는 체적평균값을 기준으로 표현하며, 문헌에 의하면 평균입경이 유기물질은 500 $\mu\text{m}$  이하, 금속분진은 100 $\mu\text{m}$  이하에서 분진폭발의 위험성이 있는 것으로 알려져 있다. 평가대상 시료 4종 모두 분쇄 후 체를 통과한 분진만 분리하여 측정함에 따라 전체 시료에 대해 대표성을 가진다고 볼 수는 없으나 부유조건을 만들기 위해서는 필요한 전처리이다.

〈표 IV-16〉 시료별 입도분석(부피기준) 결과

시료명	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50(중간값) [ $\mu\text{m}$ ]	D90 [ $\mu\text{m}$ ]
A-3	0.438	1.314	2.125
C-3	0.480	1.703	2.213
D-3	0.463	1.306	2.067
E-3	0.425	1.513	2.001

## (2) 분진폭발시험

200℃에서 건조한 A-3, C-3, D-3, E-3(B-3은 점성이 있어 제외) 시료 4종에 대해 20-L 구형시험장치로 (60~750)g/cm<sup>3</sup>의 범위로 분진농도를 달리하면서 분진폭발시험을 실시한 결과, (0.5~0.9)bar의 폭발압력결과를 얻었다. 시험 특성상 두 전극사이로 전압을 인가하여 전기적 에너지에 의해서 화학점화기를 폭발시켜 폭발압력을 측정하는 방식으로 위 결과값으로는 분진폭발압력과 점화기의 폭발로 인한 압력을 명확히 구분할 수 없어 분진폭발가능 여부에 대한 판단은 어려우며, 추후 TOC(총유기탄소량) 및 금속염 함유여부 등에 대한 정상 파악을 통해 가연성 성분의 함유여부 및 함량 등을 평가할 필요가 있다.

## 2) 열분석(DSC, TGA, ARC)

### (1) DSC 및 TGA 결과

DSC(시차주사열량계)를 이용하여 각 시료별 열안정성을 평가하기 위해 공기 분위기에서 시료량 약 2mg을 투입하여 10℃/min의 승온속도로 (30~600)℃까지 가열하였다. 슬러지는 특성상 수분이 다량 포함되어 DSC 커브에서 증발로 인한 흡열 피크가 상대적으로 크게 나와 산화, 분해 등의 발열 피크가 작게 나올 수 있기 때문에 수분을 제거하여 100℃ 이상에서의 열적 거동을 평가하기 위해 각 시료는 107℃에서 1시간 건조하여 측정하였다. 또한 이와 비교하기 위해 200℃에서 건조한 시료를 측정하였다.

이상반응에 의한 화재·폭발에 영향을 미칠 수 있는 발열피크의 온도범위 및 발열량은 A-2 시료는 (143~209)°C에서 24J/g, B-2 시료는 (158~238)°C에서 505J/g, C-2 시료는 (171~243)°C에서 150J/g, D-2 시료는 (155~228)°C에서 189J/g, E-2 시료는 150°C부터 기준선을 이탈하면서 발열이 시작되며 (239~351)°C에서 537J/g으로 이는 폐수의 증발농축 전처리 과정에서 사용되는 고분자 응집제 등이 포함된 유기화합물의 산화분해에 기인한 것으로 추정된다[그림 IV-12]~[그림 IV-16]. 사고가 발생한 사업장의 E-2 시료의 경우, 공기 및 질소 분위기 시험결과를 비교하였을 때, 그래프에서 나타나는 2개의 발열피크가 유사한 경향을 보였으며 이를 통해 239°C부터 질소 분위기에서는 열적분해(thermal decomposition)가, 공기 분위기에서는 열적분해 뿐만 아니라 산화분해(thermal oxidation)가 동시에 발생한 것으로 추정할 수 있다. 공기 분위기에서는 최대온도 296°C를 갖는 급격한 발열피크가 관찰되었다[그림 IV-17].

E-2 시료의 열중량분석(TGA) 결과, 107°C에서 건조처리 후 측정하였으나 181°C까지 흡열을 동반한 15%의 질량감소를 보임에 따라 슬러지 내 결합수 또는 높은 비점을 갖는 물질로 인한 것으로 추정할 수 있다. 공기분위기에서 가열에 따른 유기물의 산화분해반응은 (181~555)°C의 온도범위에서 45%의 질량손실을 동반하였다[그림 IV-18].

슬러지의 열건조 과정에서 발생하는 분진은 연료(fuel) 생성물이며, 연료+산소=산화물+열과 같은 화학반응에 기인한 폭발을 일으킬 수 있으며<sup>3)</sup>, 건조한 형태의 하수 슬러지는 갈탄과 유사하게 높은 발열량을 갖는 유기물이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 또한, 비정상적인 건조 작업(건조작업이 중단되어 일부 고형물이 정상조건보다 오랜 시간 건조기에 남음)은 자연발화에 이르기까지 건조한 폐수 슬러지의 자기발열(self-heating)에 많은 영향을 끼치며, 일반적인 조건의 건조 작업은 중간정도의 자기발열 성향을 가진 슬러지를 생성하는 것으로 평가된다.<sup>5)</sup>

3) flammability properties of thermally dried sewage sludge, Fuel, 134(2014), 636-643

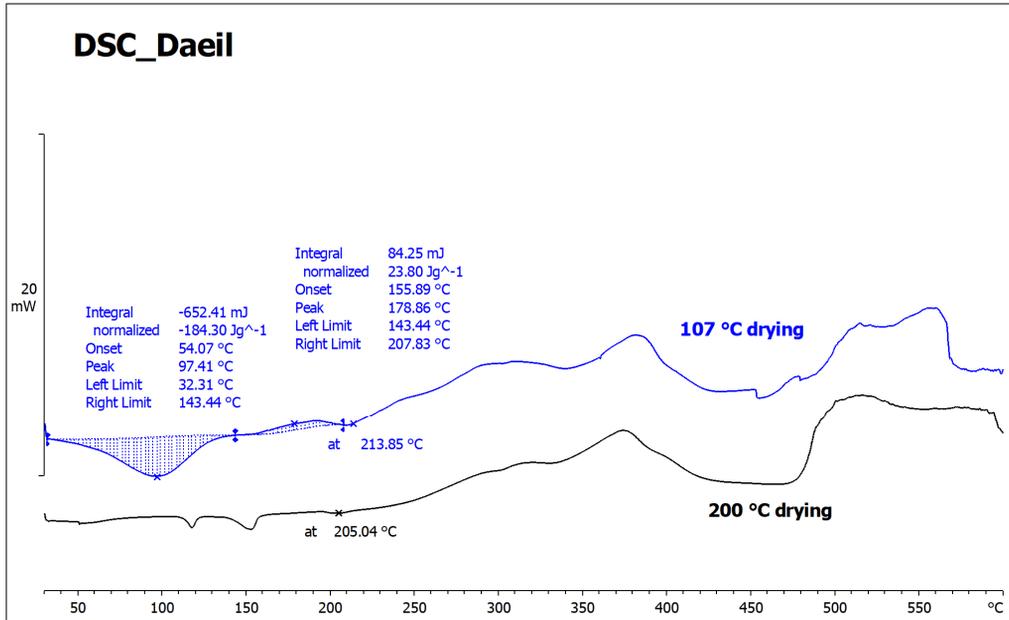
4) Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS, Waste Management, 34(2014), 174-179

〈표 IV-17〉 시료별 DSC 결과 요약

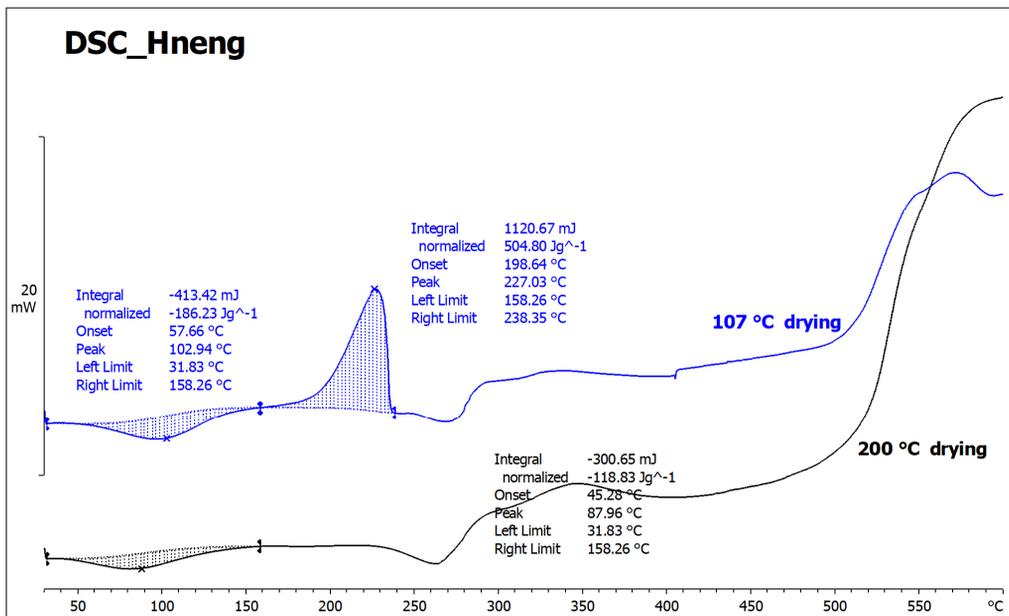
시료명	구분	개시온도 (°C)	외삽개시온도 (°C)	최대온도 (°C)	반응열 (J/g)
A-2	흡열	32	54	97	(-)184
	발열	143	156	179	24
A-3	발열	205	-	-	-
B-2	흡열	32	58	103	(-)186
	발열	158	199	227	505
B-3	흡열	32	45	88	(-)119
C-2	흡열	32	44	84	(-)125
	발열	171	233	236	150
C-3	발열	약 230°C	-	-	-
D-2	흡열	34	45	80	(-)32
	발열	155	183	202	189
D-3	발열	약 210°C	-	-	-
E-2	발열	약 160°C	-	-	-
	발열	239	294	296	537
E-3	발열	235	304	306	795

또한 107°C에서 건조했을 때 관찰된 발열피크(200°C 전후 범위)가 200°C에서 건조했을 때 사라짐에 따라 건조과정에서 분해되는 성분이 포함되어 있던 것으로 추정된다. 즉 전처리 공정인 물리화학적 처리에서 제거되지 않고 여과액(filtrate)의 형태로 이동하는 수용성 및 불용성 물질 중 물보다 비점이 높은 물질은 농축 공정에서 기상물질로 제거되지 않을 수 있다. 이 경우 온도 조절이 실패하거나 진공조건이 깨지는 등의 비정상 상태가 발생하여 내부온도가 건조기 내에 농축된 잔류물의 끓는점 및 발열개시온도에 접근하는 경우, 물질의 휘발 및 분해반응에 의해 생성된 가스로 인한 압력상승에 의한 과압으로 설비의 물리적 폭발을 동반한 화재발생의 가능성을 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

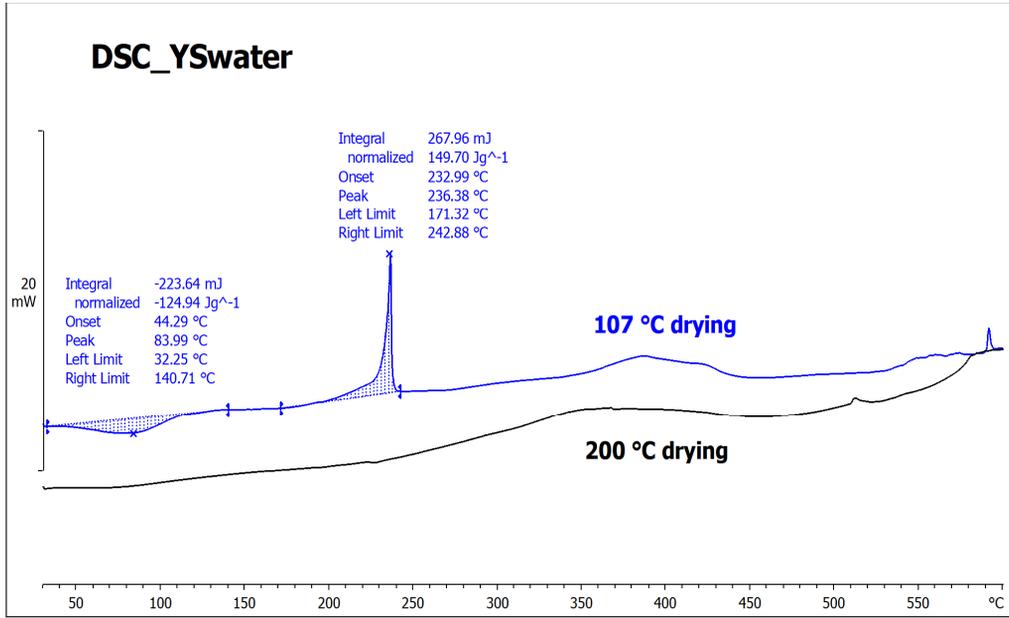
5) Self-heating of dried wastewater sludge, Waste Management, 33(2013), 129-137



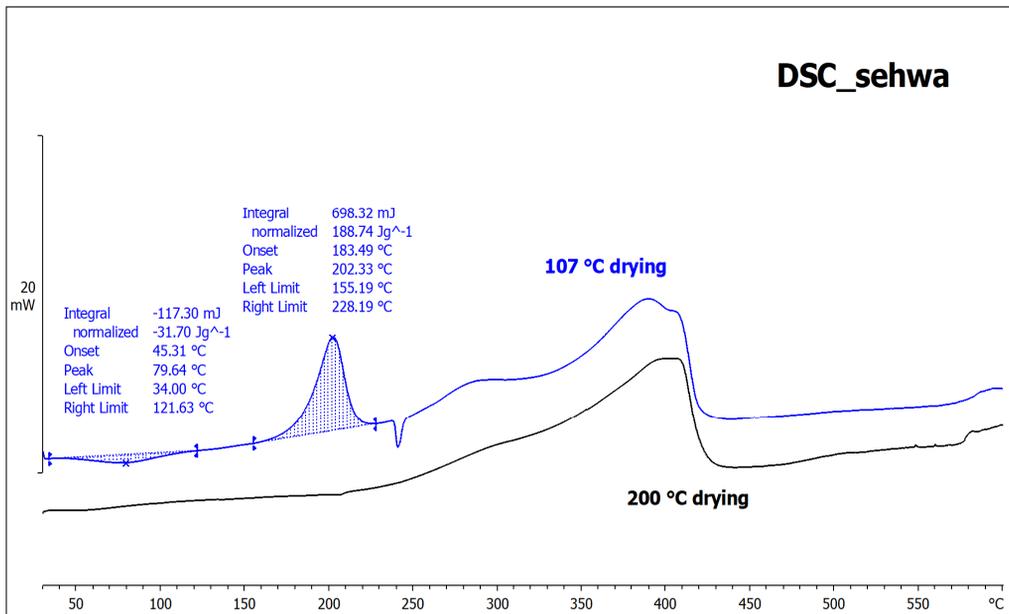
[그림 IV-12] A-2, A-3 DSC 결과



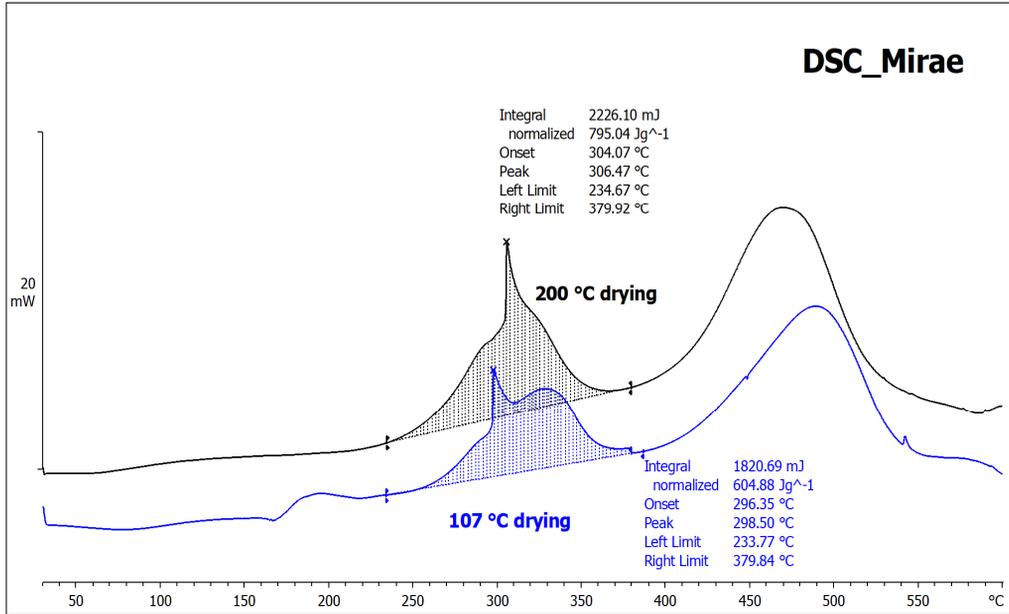
[그림 IV-13] B-2, B-3 DSC 결과



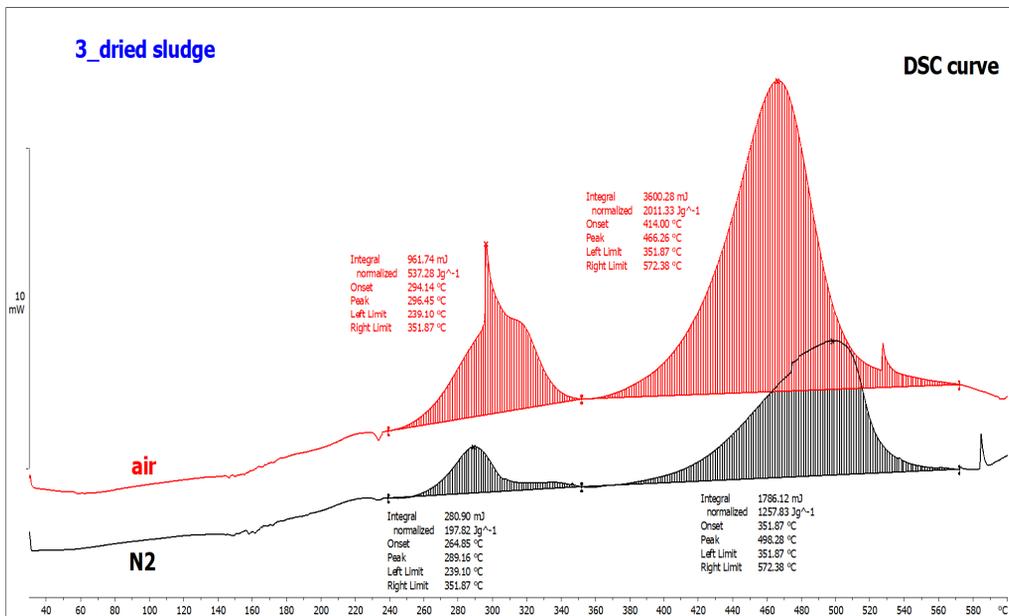
[그림 IV-14] C-2, C-3 DSC 결과



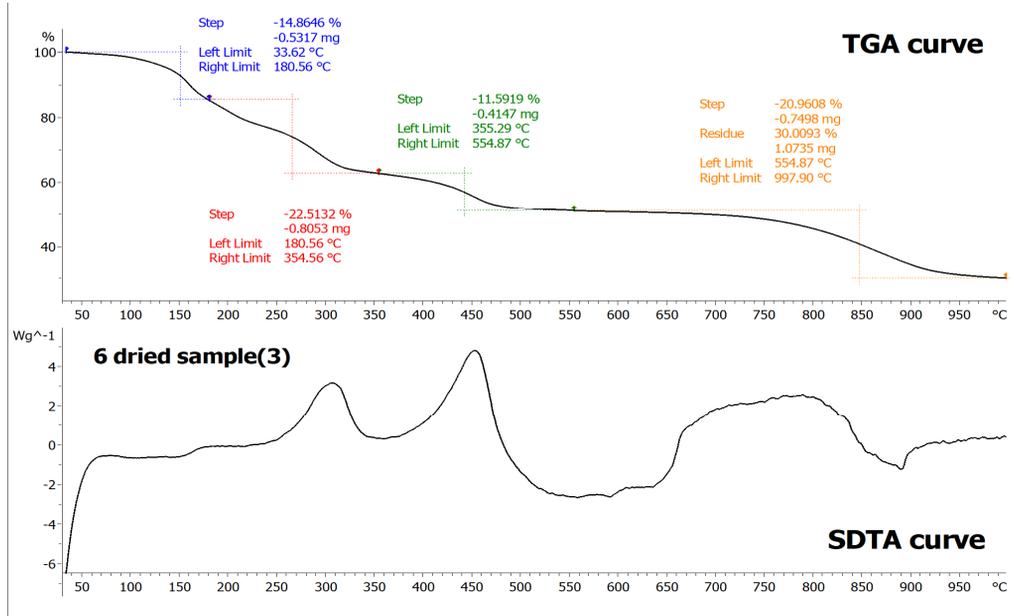
[그림 IV-15] D-2, D-3 DSC 결과



[그림 IV-16] E-2, E-3 DSC 결과



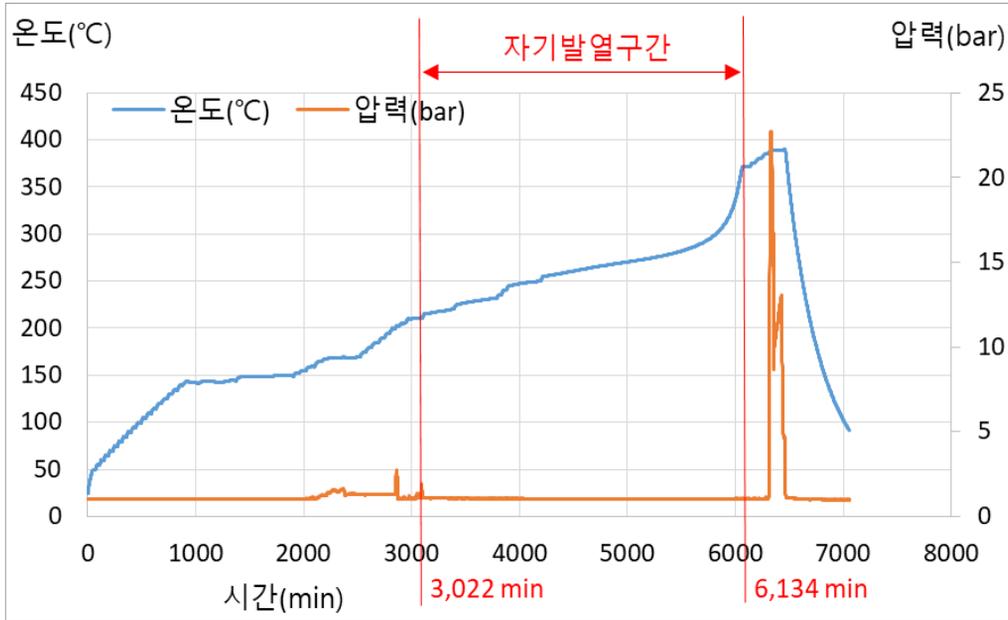
[그림 IV-17] E-2의 공기 및 질소 DSC 결과 비교



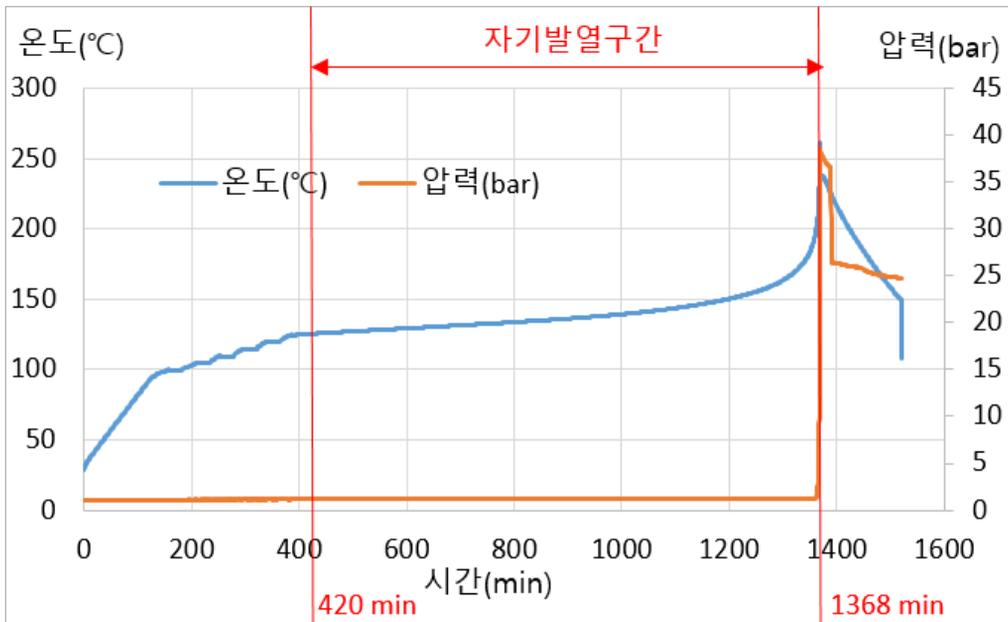
[그림 IV-18] E-2의 TGA 결과

## (2) ARC 결과

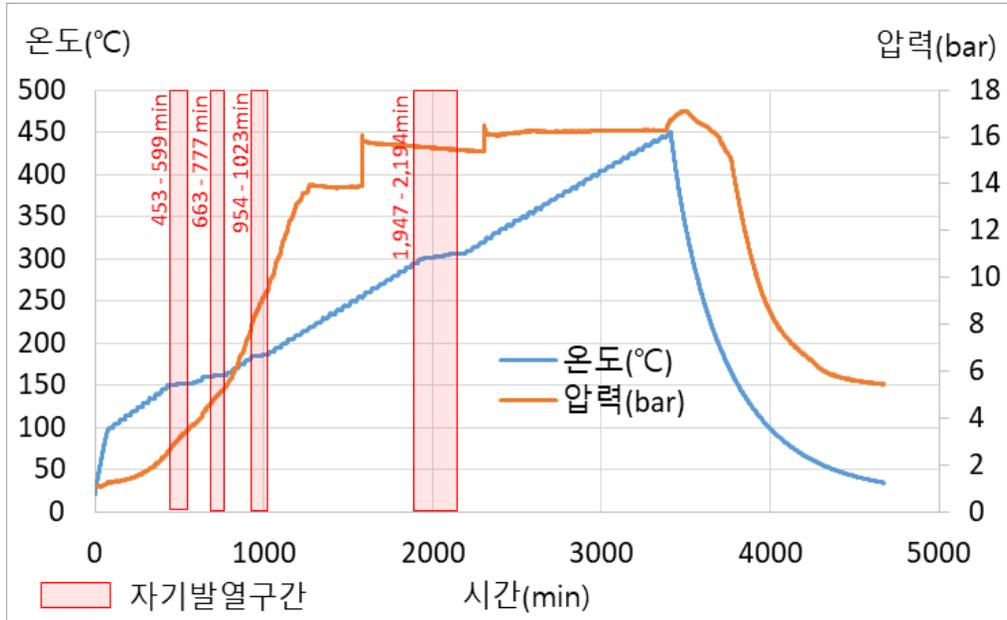
ARC(가속속도열량계)는 자기가속분해반응 등의 열폭주를 확인하고자 단열 조건에서 화학물질의 잠재적인 위험성을 평가하기 위해 사용된다. 사고가 발생한 증발건조기의 경우 내부온도를 제어하지 않고 일정온도의 스팀을 자켓에 투입하는 방식으로 진행하는데 이 경우, 특성상 시스템 내부에 잠열을 이용할 수 있는 용매의 양도 제한적이며, 별도의 냉각장치가 없는 이상 내부에 이상반응이 발생하는 경우 내부의 열을 제거할 수 있는 방법이 없으며 단열조건에 가까운 상태로 유지될 가능성이 매우 높다(산업안전보건연구원, 2021). 따라서, 증발건조과정을 거친 3개 시료에 대해 ARC 분석을 실시하였으며, 100℃부터 5℃단위로 가열하면서 15분간 유지하는 heat-wait-search 승온방식을 이용하여 온도가 상승함에 따른 시료 내 자기발열 여부를 관찰하였다. A-2 시료는 210℃, B-2 시료는 125℃, D-2 시료는 150℃에 도달하면서 자기발열 현상의 시작으로 규정하는 발열속도인 0.03℃/min 이상의 발열이 감지되었다. 이후 외부 가열을 중단하고 내부온도상승에 따라 용기가 단열조건을 만족할 수 있도록 외부 히터 출력을 조절하면서 온도 및 압력변화를 측정하였다. B-2 시료의 경우, 약 16시간 후 내부 압력이 한계 압력을 초과하여 시험용기가 파열되면서 시험이 종료되었다. 파열 전 내부온도는 261℃까지 상승하였으며, 내부압력은 39bar까지 상승하였다. B-2의 시료의 경우, 진공건조조건에서도 증발되지 않는 성분에 의해 격렬하게 분해반응이 일어나면서 압력이 급격하게 상승된 것으로 추정되며, 자기발열개시온도가 125℃로써 건조과정에서 온도조절이 실패하거나 진공조건이 깨짐 등으로 인해 건조기 온도가 발열개시온도에 근접하게 될 경우, 폭발적인 분해반응으로 인해 압력이 상승하면서 물리적 폭발이 발생할 가능성이 충분히 있을 것으로 판단된다.



[그림 IV-19] A-2의 ARC 결과



[그림 IV-20] B-2의 ARC 결과



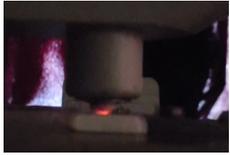
[그림 IV-21] D-2의 ARC 결과

### 3) 마찰감도시험

마찰감도는 화학물질의 기계적 에너지에 대한 민감도를 나타내는 지표로써 화학물질의 폭발감도를 평가하는데 사용된다. 본 연구에서는 KS M 4802에서 규정된 시험방법을 준용하여 평가대상 시료에 대한 마찰감도를 평가하였다. 동일한 에너지에서 시료를 매번 교체하면서 총 6회 중 1회 이상 폭발이 발생하는 최저 에너지를 기준으로 결과를 산출하였다. 마찰감도의 적용 가능한 시료조건은 흡습되지 않은 시료이기 때문에 200°C에서 건조한 시료를 사용하였다. A는 (156.9~353.0) N, B는 353.0 N, C는 (235.4~353.0) N, E는 (188.3~353.0) N의 마찰에너지가 인가되었을 때 폭발로 간주할 수 있는 불꽃이 관측되었으며, D시료는 353.0 N의 마찰에너지가 인가되었음에도 폭발로 간주할 수 있는 폭음이나 불꽃, 연기가 관찰되지 않았다. 따라서 시료 A, B, C, E는 일정수준 이상의 마찰에너지에 의해 분해 또는 착화의 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

농축된 폐수를 농축기에서 건조기로 이송하는 과정에서 슬러지로 인해 배관이 막히는 경우 작업자가 배관을 타격하는 경우, 과건조된 슬러지와 공구와의 마찰이나 충격으로 인한 기계적 에너지가 점화원으로 작용할 수 있기 때문에 슬러지의 과건조를 예방하기 위해 건조공정을 종결하고 배출하기 위한 정량화된 종점조건을 확립하는 것이 중요하다.

〈표 IV-18〉 마찰감도시험 결과

시료명	결과	불꽃 사진 (인가 전후)	
A-3	6급 (156.9 N)		
B-3	7급 (353.0 N)		
C-3	6급 (235.4 N)		
D-3	불폭발	-	-
E-3	6급 (188.3 N)		

#### 4) 금속원소 분석

ICP-OES(유도결합플라즈마분광광도계)를 이용하여 금속의 성분분석 결과를 <표 IV-19>에 나타내었다. 폐수의 중화처리에서 사용되는 중화제로 수산화나트륨(NaOH), 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 산화칼슘(CaO), 탄산마그네슘(MgCO<sub>3</sub>) 등으로 인해 나트륨, 칼륨의 비율이 다른 금속보다 상대적으로 높게 나온 것으로 판단된다.

<표 IV-19> 시료별 금속원소 성분분석 결과

(단위 : wt(%))

분석 항목	A	B	C	D	E
나트륨	21.73	3.41	17.09	23.05	18.58
칼륨	7.25	1.73	4.25	0.90	2.26
칼슘	0.16	ND	3.66	0.52	0.13
구리	0.03	0.08	0.15	1.32	0.06
철	0.09	0.06	0.20	1.50	0.15
알루미늄	0.02	0.32	0.62	0.69	0.27
마그네슘	0.07	0.23	1.09	0.11	0.06
니켈	0.28	0.39	0.48	0.23	0.12
망간	0.01	ND	0.59	0.04	ND
아연	ND	0.04	0.42	0.61	0.18

※ 검출한계 : 알루미늄 0.39, 칼슘 0.48, 구리 0.39, 철 0.56, 칼륨 5.20, 마그네슘 0.92, 망간 0.49, 나트륨 0.41, 니켈 0.56, 티타늄 0.45, 아연 0.46(ug/mL)

## V. 폐수 증발농축공정의 안전관리방안





## V. 폐수 증발농축공정의 안전관리 방안

### 1. 공정(설비) 관련 안전관리 방안

증발건조기는 증발농축기에서 농축된 폐수를 교반하면서 수분을 증발시키면서 건조하기 때문에 「산업안전보건기준에 관한 규칙 [별표 7] 화학설비 및 그 부속설비의 종류」에서 혼합장치(혼합조), 열교환기류(가열기, 증발기), 압축설비(압축기, 이젝터)로 분류될 수 있다.

〈표 V-1〉 화학설비 및 그 부속설비의 종류

화학설비 및 그 부속설비의 종류(산업안전보건기준에 관한 규칙 [별표 7])

#### 1. 화학설비

- 가. 반응기·혼합조 등 화학물질 반응 또는 혼합장치
- 나. 증류탑·흡수탑·추출탑·감압탑 등 화학물질 분리장치
- 다. 저장탱크·계량탱크·호퍼·사일로 등 화학물질 저장설비 또는 계량설비
- 라. 응축기·냉각기·가열기·증발기 등 열교환기류
- 마. 고로 등 점화기를 직접 사용하는 열교환기류
- 바. 캘린더(calender)·혼합기·발포기·인쇄기·압출기 등 화학제품 가공설비
- 사. 분쇄기·분체분리기·용융기 등 분체화학물질 취급장치
- 아. 결정조·유동탑·탈습기·건조기 등 분체화학물질 분리장치
- 자. 펌프류·압축기·이젝터(ejector) 등의 화학물질 이송 또는 압축설비

#### 2. 화학설비의 부속설비(이하 생략)

사고가 발생한 증발건조기는 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 별표 9에 따른 위험물을 기준량 이상 제조·취급하는 특수화학설비(표 IV-2)는 아니지만 폐수 농축액 내 성상이 확인되지 않는 물질에 의해 반응폭주 등 이상 화학반응이 일어날 수 있기 때문에 특수화학설비 안전조치에 준하는 조치를 실시하는 것을 고려해야 한다.

## 〈표 V-2〉 특수화학설비 관련 법령(산업안전보건기준에 관한 규칙)

### 제273조 계측장치 등의 설치

사업주는 별표9에 따른 위험물을 같은 표에서 정한 기준량 이상으로 제조하거나 취급하는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 화학설비(이하 “특수화학설비”라 한다)를 설치하는 경우에는 내부의 이상 상태를 조기에 파악하기 위하여 필요한 온도계·유량계·압력계 등의 계측장치를 설치하여야 한다.

1. 발열반응이 일어나는 반응장치
2. 증류·정류·증발·추출 등 분리를 하는 장치
3. 가열시켜 주는 물질의 온도가 가열되는 위험물질의 분해온도 또는 발화점보다 높은 상태에서 운전되는 설비
4. 반응폭주 등 이상 화학반응에 의하여 위험물질이 발생할 우려가 있는 설비
5. 온도가 섭씨 350도 이상이거나 게이지 압력이 980킬로파스칼 이상인 상태에서 운전되는 설비

### 제274조 자동경보장치의 설치 등

사업주는 특수화학설비를 설치하는 경우에는 그 내부의 이상 상태를 조기에 파악하기 위하여 필요한 자동경보장치를 설치하여야 한다. 다만, 자동경보장치를 설치하는 것이 곤란한 경우에는 감시인을 두고 그 특수화학설비의 운전 중 설비를 감시하도록 하는 등의 조치를 하여야 한다.

### 제275조 긴급차단장치의 설치 등

- ① 사업주는 특수화학설비를 설치하는 경우에는 이상상태의 발생에 따른 폭발·화재에 또는 위험물의 누출을 방지하기 위하여 원재료 공급의 긴급차단, 제품 등의 방출, 불활성가스의 주입이나 냉각용수 등의 공급을 위하여 필요한 장치 등을 설치하여야 한다.
- ② 제1항의 장치 등은 안전하고 정확하게 조작할 수 있도록 보수·유지되어야 한다.

## 1) 계측장치 및 자동경보장치 설치

증발건조기 내부의 온도 및 압력, 진공상태 등이 정상운전 상태인지를 확인하고, 정상범위를 이탈할 경우를 감지할 수 있는 온도계, 압력계 등의 계측장치와 자동경보장치를 설치하고, 긴급차단장치 등과 연동(Interlock)<sup>1)</sup>하도록 설비를 구성해야 한다.

1) 두 개 이상의 메커니즘 또는 기능의 상태를 서로 의존하도록 만들어, 하나의 기능이 작동되는 경우, 다른 기능은 작동하지 않도록 잠금(lock)하는 상호 연동 장치임

## 2) 긴급차단장치 설치

농축액 내 성분간 이상반응 등으로 인해 내부온도가 급격하게 상승하는 경우 온도계와 연동하여 스팀 공급 긴급차단장치와 냉각수 공급장치 등을 설치함으로써 급격한 온도상승을 제어해야 한다. 실태조사 결과 일부 사업장의 경우, 건조기 자켓 스팀의 압력을 측정하여 자동으로 공급을 차단하는 자동 차단 밸브가 설치되어 있으나 부식 등으로 인한 잦은 고장으로 정상 작동되지 못한 경우가 있어 지속적인 점검 및 보수를 통해 항상 작동될 수 있도록 관리해야 한다.

## 3) 안전밸브 설치

농축액 내 성분간 이상반응 등으로 인해 압력이 급격하게 증가하여 최고사용 압력을 초과할 우려가 있기 때문에 압력 해소에 충분한 용량을 가진 안전밸브를 설치해야 한다.

## 4) 수탁폐수 간 반응위험성 확인

수탁폐수 간 반응여부의 확인을 위해 실시하는 항목 중 자연발화성의 경우, 증발농축 및 증발건조 처리 과정의 온도 조건과 정상운전 범위를 이탈하여 온도가 상승하는 조건에서의 혼합위험성은 아니기 때문에 증발건조 조건과 수분이 어느 정도 제거되어 농축액 내 성분간에 반응할 수 있는 유사한 환경에서 반응 여부를 확인할 수 있는 분석방법 도입을 검토하여 수탁폐수 간 이상반응에 의한 위험성을 배제해야 한다.

## 2. 관리적 측면의 안전관리 방안

### 1) 안전운전절차서의 운전단계별 구체적 작성

사업장 실태조사 결과, 안전운전절차서를 설비 운전 위주의 내용으로 제조사에서 작성한 내용 그대로 보관한 경우가 대부분이었다. 따라서 정상 및 비정상 운전, 비상시 운전, 정비 후 운전 개시, 운전범위를 벗어났을 경우 등의 조치절차 및 폐수의 혼합확인 결과 등을 반영하여 운전단계별로 안전운전절차서를 구체적으로 작성해야 한다.

### 2) 비상조치계획 수립 및 주기적 훈련 실시

동종 유사사고사례 및 아차사고사례 등을 반영하여 끼임, 떨어짐, 넘어짐 뿐만 아니라 화재·폭발·누출 등 다양한 시나리오별 비상대응체계를 포함한 비상조치계획을 수립하여 시나리오별로 주기적인 직원 훈련 및 교육을 실시 해야 한다.

### 3) 위험성평가 실시 및 적정성 주기적 재검토

증발농축공정을 포함하여 폐수의 입고과정부터 모든 폐수처리 공정에서 발생할 수 있는 모든 유해·위험요인에 대하여 위험성평가를 실시해야 한다. 기계·기구, 설비 등의 기간 경과에 의한 성능저하, 근로자의 교체 등에 수반하는 안전·보건과 관련되는 지식 변화 등을 고려하여 위험성 결과에 대한 적정성을 1년마다 정기적인 재검토가 필요하다. 또한 사업장내 설비의 설치·이전·변경 또는 해체, 기계·기구, 설비 등의 정비 또는 보수, 작업방법 또는 작업절차의 신규 도입 또는 변경 등의 계획이 있는 경우 실행 착수 전 수시 위험성평가를 실시할 필요가 있다.

## VI. 결 론





## VI. 결 론

본 연구에서는 증발농축공정을 사용하여 폐수를 처리하는 폐수수탁업 사업장에서 화학사고 예방을 위한 안전관리 방안을 마련하고자 하였다. 이를 위해 관련 사업장 실태를 파악하고, 관련 법규 조사, 사고사례 분석, 공정물질에 대한 화재·폭발 특성 조사 및 시험 등을 통해 화학사고 예방을 위한 안전관리 방안을 도출하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

### 1. 폐수 배출 및 처리 현황

#### 1) 폐수 배출 현황

소규모 사업장에서 위탁하는 고농도 난분해성 폐수의 증가에 따라 폐수위탁업체 및 폐수처리업체수도 증가하고 있으며, 전체 폐수배출업소의 26%가 위탁처리에 의해 폐수를 처리하는 것으로 나타났다.

#### 2) 폐수처리업 현황

폐수처리업으로 등록된 사업장 중 근로자수 50인 미만의 소규모 사업장이 89%(75개소)를 차지하며, 안전보건관리담당자 선임 의무가 없는 20인 미만인 사업장은 57%(48개소)로 안전관리 체계 확보 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다. 폐수를 수탁, 수탁/재이용, 재이용하는 79개 폐수처리업 사업장 중 81%인 64개소가 증발농축공정을 사용하고 있다.

## 2. 폐수 배출·처리 관련 법령 및 안전관리 현황

### 1) 폐수 배출·처리 관련 법령

산업폐수 관리체계는 기본적으로 「물환경보전법」에 근거하여 배출시설 설치 허가 및 신고제도, 입지 제한, 배출허용기준 적용, 지도·점검 등을 통하여 규제되고 있다. 적정처리에 고비용이 소요되는 폐수를 발생시키는 사업장에서 폐수를 위탁 처리하게 되는데 이러한 폐수의 적정 처리를 위해 폐수처리업 제도가 운영되고 있다. 환경부는 폐수처리업의 안전관리기준을 강화하고자 2020년 물환경보전법 하위법령을 개정하였다. 등록제에서 허가제로 변경되면서 허가절차, 기술능력, 시설 및 장비 등의 허가기준을 마련했으며, 수탁받은 폐수를 다른 폐수와 혼합 처리하는 경우 사전에 폐수 간 반응여부를 확인하도록 했다. 그러나 증발농축 및 증발건조 처리 과정의 온도 조건과 정상운전 범위를 이탈하여 온도가 상승하는 조건에서의 혼합위험성은 아니기 때문에 이로 인한 발열과 열분해에 의한 화재 폭발 위험성을 사전에 예방하는 데에는 혼합확인만으로는 한계가 있는 것으로 판단된다.

### 2) 폐수 수탁업 사업장의 안전관리 현황

수탁받은 폐수에 대해 계약 체결전에 폐수 성상을 확인하는 절차를 거친 후, 수탁폐수 간 혼합 확인을 실시하는 것으로 조사되었다. 증발건조기에는 진공만 측정할 수 있는 진공게이지가 설치되어 있고, 압력발생시 이를 해소하기 위해 판체크밸브, 비상통기설비 형태, 파열판 등은 설치되어 있으나 안전밸브는 없는 것으로 확인되었다. 정상운전조건 이탈시 경보가 울리도록 되어 있으며, 급격한 온도 및 압력상승과 같은 이상반응시 스팀 공급차단과 냉각수 공급의 연동은 미설치되어 있었다. 또한 안전운전절차서는 설비의 운전 및 유지보수 관련 설명의 위주로 정상운전조건 이탈시의 절차에 대해서는 포함하지 않았다.

### 3. 폐수 처리업 사업장의 사고사례

#### 1) 재해 현황

폐수처리업으로 등록된 사업장의 2013년부터 2023년 8월까지 재해현황은 사망 16명, 부상 158명, 재해건수는 156건이며 떨어짐, 넘어짐, 이상온도 노출·접촉 등의 순으로 많이 발생하였다. 발생형태를 화재, 폭발, 이상온도 및 화학물질 누출·접촉으로 한정하여 업종별로 분류한 결과, 전체 54건 중 51건(94.4%)이 수탁 및 수탁·재이용업 사업장에서 발생하였다.

#### 2) 증발농축공정 사고사례

2020년과 2023년, 각기 다른 폐수수탁업 사업장에서 화재사고가 발생했으며, 두 사고 모두 증발농축(건조)기의 온도가 상승함에 따라 슬러지가 과건조되어 분출되면서 화재가 발생한 것으로 보고되었다. 수탁폐수업의 경우 폐수의 성상에 따른 유연한 처리가 불가능함에 따라 유사사고를 방지하기 위해서는 폐수 수탁업 사업장의 안전관리에 대한 근본적인 대책이 필요한 것으로 판단된다.

### 4. 폐수 증발농축공정 물질의 화재·폭발특성 평가

폐수수탁업 사업장에서 증발건조기를 거쳐 톤백에 담겨 탈수 및 보관하는 과정에서 채취한 슬러지 시료 4개와 2023년에 사고가 발생한 사업장에서 증발건조기에 투입되기 직전의 폐수 시료 1개에 대해 화재·폭발 특성을 평가하였다. DSC 분석 결과 (143~171)℃ 범위에서 발열이 시작되었으며, ARC를 이용하여 단열조건에서 자기발열개시온도 측정한 결과, 125℃에서 자기발열이 시작되고 온도 및 압력이 증가하면서 용기가 파열된 경우도 관찰되었다. 따라서

온도 조절이 실패하거나 진공조건이 깨지는 등의 비정상 상태가 발생하여 내부온도가 건조기 내에 농축된 잔류물의 끓는점 및 발열개시온도에 접근하는 경우, 물질의 휘발 및 분해반응에 의해 생성된 가스로 인한 압력상승에 의한 과압으로 설비의 물리적 폭발을 동반한 화재발생의 가능성을 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 4개 시료는 마찰에너지에 의해 분해 또는 착화의 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

## 5. 폐수 증발농축공정의 안전관리 방안

사고가 발생한 증발건조기는 폐수 농축액 내 성상이 확인되지 않는 물질에 의해 반응폭주 등 이상 화학반응이 일어날 수 있기 때문에 특수화학설비 안전조치(계측장치, 자동경보장치, 긴급차단장치 등의 설치)에 준하는 조치를 실시하는 것을 고려해야 한다. 또한 폐수 혼합확인 시 증발건조기의 공정과 유사한 환경에서 반응 여부를 확인할 수 있는 분석방법을 도입을 검토하여야 할 것으로 판단된다. 관리적 측면에서는 안전운전절차서의 구체적 작성, 주기적인 근로자 교육 실시 등이 필요할 것으로 판단된다.

## 6. 연구의 한계 및 향후 과제

### 1) 연구의 한계

본 연구에서는 국내 폐수수탁업을 중심으로 관련 법령 및 안전관리 실태 등을 조사하였다. 폐수수탁업 외에도 폐수배출사업장에서 증발농축공정을 이용하여 폐수처리를 하고 있으나 연구대상에서는 제외하였다. 폐수 특성상 입고되는 수탁폐수의 종류가 다양하고, 전처리 단계도 다르기 때문에 증발농축 및 건조 과정에서 생성되는 화학물질에 대한 시험결과를 일반화하기는 어려우나 이들 물질에 의한 열적 위험성 및 화재·폭발 특성을 확인할 수 있었다.

## 2) 향후 과제

수탁폐수 입고시 수행하는 자연발화성 확인의 경우, 폐수 슬러지의 과건조에 의한 화재·폭발 위험성을 증발농축 및 증발건조 처리 과정의 온도 조건과 정상운전 범위를 이탈하여 온도가 상승하는 조건에서의 혼합위험성은 아니기 때문에 이로 인한 발열과 열분해에 의한 화재 폭발 위험성을 사전에 예방하는데에는 혼합확인으로는 한계가 있는 것으로 판단된다. 이와 관련된 국외 사례 및 시험방법 등을 검토하여 반응위험성에 대한 혼합확인 절차 개발을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.



## 참고문헌

- 강진영 등. 가축분뇨 관리제도 개선 기본 용역(최종보고서). 제주발전연구원; 2020.
- 김경민. 산업폐수 배출관리 현황과 개선방안. 국회입법조사처;2015.
- 물환경보전법, 시행령, 시행규칙, 국가법령정보센터
- 박재홍, 류덕희. 소규모 폐수배출시설 관리 강화의 필요성, Journal of Korean Society on Water Environment. 2018;34(2):226-233 p.
- 박지혜 등. 하폐수 재이용 활성화를 위한 정책방안 연구. 한국수자원공사;2020.
- 산업안전보건법, 시행령, 시행규칙, 국가법령정보센터
- 양권석. 스케일 및 거품 제거 기능이 구비된 진공 증발 농축장치. 특허출원번호 10-2017-0054143;2018.
- (주)월드에너지. 패키지형 산업폐수 진공증발농축순환시스템 개발. 환경부;2011.
- 이정임 등. 폐수슬러지의 효율적 처리 방안. 경기연구원;2018.
- 이철호. 슬러지의 재활용 기술 동향. 화학공학소재연구정보센터.
- 한대호. 산업폐수 소량배출사업장의 및 처리업체 관리 선진화방안 연구. 환경부; 2014.
- 홍원석 등. 마이크로 기포를 이용한 침수형 연소증발 농축시스템 상용화 기술 개발. 국가과학기술연구회(한국기계연구원);2015.
- 환경부·국립환경과학원. 2023년 산업폐수의 발생과 처리;2023.

Junfeng W. et al., Suppression of Aluminum Dust Explosion by  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2/\text{RM}$  Composite Powder with Core-Shell Structure: Effect and Mechanism. Processes. 2019;7:761.

Wei L., et al., Advanced oxidation processes(AOPs)-based sludge conditioning for enhanced sludge dewatering and micropollutants removal:A critical review, Journal of water process engineering. 2022;45:102468.

EECA, MVR(Mechanical Vapour Recompression) systems for evaporation, distillation and drying. Technical information document:2019.

Paola F., et al., Environmental and Health Management of Novel Coronavirus Disease (COVID-19 ),Chapter 6-Route of SARS-CoV-2 in sewerage and wastewater treatment plants: dilution, decay, removal, and environmental transmission. Environmental Management of COVID-19;2021:145-176 p.

# Abstract

## Fire explosion hazard and safety management measures for wastewater evaporative concentration process

**Objectives:** We aimed to develop a safety management measures to prevent chemical accidents at a wastewater treatment plant that treats wastewater using the evaporation concentration process.

**Method:** We identified the actual situation of the business site, investigated related laws and regulations, analyzed accident cases, and investigated and tested the fire and explosion characteristics of process materials.

**Results:** Of the workplaces registered as wastewater treatment businesses, 89% (75) are small businesses with fewer than 50 workers, and 57% (48) have fewer than 20 workers who are not obligated to appoint a safety and health manager. The Ministry of Environment has strengthened the safety management standards of the wastewater treatment industry and requires that the reaction between wastewater and other wastewater be checked in advance if the wastewater is mixed with other wastewater. However, since the risk of mixing is not the same as the temperature condition of the evaporation concentration process and the temperature rising beyond the normal operating range, it is judged that the mixing check alone is limited to prevent the risk of fire explosion due to heat

generation and thermal decomposition. The evaporative dryer was equipped with a vacuum gauge that can only measure vacuum, and a pan check valve, emergency ventilation system, and rupture plate were installed to resolve pressure, but no safety valve was found. An alarm is supposed to sound in case of deviation from normal operating conditions, and the interlocking of steam supply and cooling water supply was not installed in case of abnormal reactions such as sudden increase in temperature and pressure. In 2020 and 2023, fires occurred at different wastewater treatment plants, and both incidents were reported to have been caused by the overdrying and eruption of sludge as the temperature of the evaporative concentration unit increased. The evaluation of the fire explosion characteristics of the material produced in the evaporative concentration process confirmed that if the internal temperature approaches the exothermic initiation temperature of the concentrated residue in the dryer, it can explode due to overpressure caused by the gas generated by the volatilization and decomposition reaction of the material. It was also evaluated that there is a possibility of decomposition or ignition due to friction energy.

**Conclusion:** Consideration should be given to implementing measures in accordance with the safety measures for special chemical facilities (installation of measuring devices, automatic alarms, emergency shutdown devices, etc.). In addition, when checking wastewater mixing, consideration should be given to introducing analytical methods that can confirm the reaction in an environment similar to the evaporative drying process.

**Key words:** Wastewater, Evaporative concentration process, fire and explosion hazard

## 연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 최이락 (연구위원, 산업안전연구실)

연구위원 : 서동현 (연구위원, 산업안전연구실)

연구원 : 정기혁 (차장, 산업안전연구실)

연구원 : 이한희 (차장, 산업안전연구실)

연구원 : 김천동 (과장, 산업안전연구실)

## 연구기간

2023. 07. 19. ~ 2023. 11. 30.

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

산업안전보건연구원장

**폐수 증발농축공정의 화재폭발 위험성 및 안전관리 방안**  
(2023-산업안전보건연구원-794)

발행일 : 2023년 11월 30일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 산업안전연구실 연구위원 최이락

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 증가로 400

전화 : 042-869-0334

팩스 : 042-863-9003

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

I S B N : 979-11-93642-54-2

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체