

재해원인조사 의견서

한국 산업 안전 보건공단

이 의견서는 「산업안전보건법」 제56조에 따라 중대재해 원인조사를 실시하고 재해 원인에 대한 의견을 작성한 것으로

「산업안전보건법」 제56조의 ‘중대재해 원인을 규명하여 산업재해의 예방 대책 수립’을 통한 안전 확보에 이바지함을 목적으로 하고 있다.

그러므로 이 의견서는 산업현장의 안전·보건을 증진시킬 목적 이외의 용도로 사용되어서는 아니 된다.

1. 재해발생 사업장 개요

사업장명		(주)웨이트에너지솔루션	전화번호	
소재지	본사	전남 목포시	대표자	E
	공장	전남 곡성군		
업 종		그 외 기타 일반 목적용 기계 제조업 (29199)	근로자수	11명
산재관리번호 (사업개시번호)			생산품 (사업내용)	열분해유

2. 재해자 인적사항 및 상해정도

연번	성명	출생년도	소 속	고용형태 (상용,일용,시간제 등)	상해정도 (사망/부상)
1	A	2004	(주)웨이트 에너지솔루션	상용	부상 (3도 화상)
2	B	2002		상용	부상 (2도 화상)
3	C	2004		상용	부상 (3도 화상)
4	D	2005		상용	부상 (3도 화상)

3. 재해발생 경위

발생형태	폭발	기인물	열분해로
2024. 9. 25.(수) 22:05경 (주)웨이트에너지솔루션 곡성공장에서 열분해로에 원료(폐그물 등)를 투입하기 위해 투입구를 개방한 상태에서 내부의 열분해유 가스*가 외부로 유출되었고, 10초 정도 경과 후 인근 열분해로 측면 하부에서 폭발이 발생하여 작업중이던 근로자 4명이 화상을 입은 재해임. * 열분해유 가스: 폐플라스틱(PE,PP)에서 나온 열분해가스로 탄소 결합이 1~5개 이고 상온에서 응축이 되지 않고 가스상으로 존재하는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄 등으로 구성			

4. 재해조사 내용

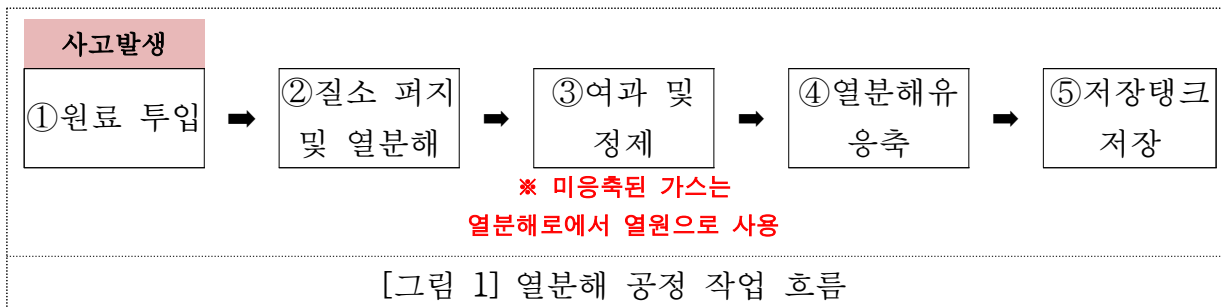
【본 조사 내용은 사업장 관계자(부사장, 설비담당직원, 운전원)의 면담 내용, CCTV 기록 등 현장 조사에서 파악된 사항을 기초로 작성하였음】

4-1. 재해발생 공정

○ 사업장 개요

- (주)웨이스트에너지솔루션은 플라스틱 폐기물인 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP)으로부터 저산소(6% 이하) 열분해를 통해 열분해유를 생산하여 판매하거나 재활용함.

○ 열분해유 제조공정



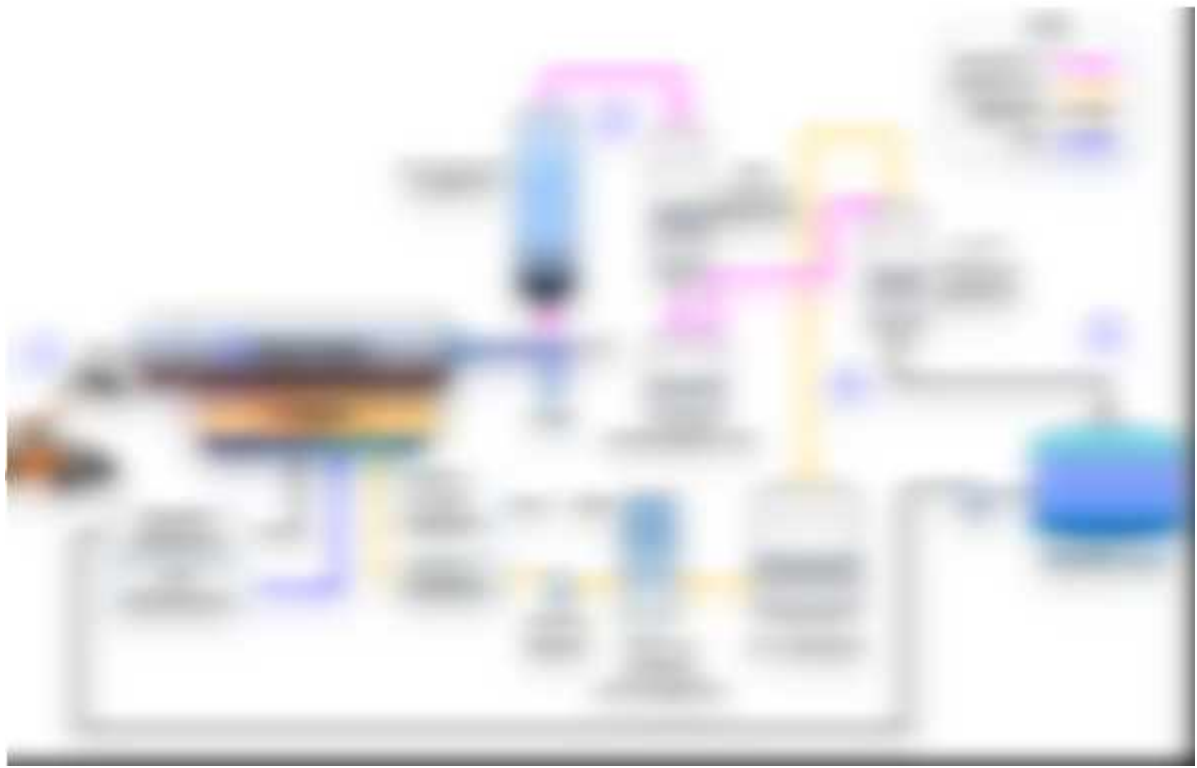
- ① 열분해유의 첫 번째 공정은 열분해로의 투입구를 개방하고 폐플라스틱 수거반업체에서 이물질 제거하고 제공받은 PE, PP(폐그물 등)를 열분해로(Rotary Kiln식, 회분식)에 텔레핸들러*를 이용하여 투입함.

* 텔레핸들러는 지게차, 스키도로더, 페이로더 기능이 합쳐진 장비로 포크, 버킷, 바구니 등 여러 부착물을 부착할 수 있고 앞뒤로 확장되는 붐이 있는 것이 특징임.

- ② 원료 투입 후 질소를 투입하여 내부 산소를 % 이하가 되도록 제거하고 버너를 작동시켜 열분해로의 온도를 ℃로 승온시키면 ℃이상부터 열분해가 일어나며 합성가스가 발생함.

- ③ 합성가스는 기체분리기와 WAX콘덴서를 통과하며 합성가스 내 분진, 이물질, 불순물 등을 제거됨.

- ④,⑤ 여과 정제된 합성가스는 2기의 콘덴서를 통과하여 액화되며 열분해유로 응축되어 저장되고 상온에서 응축되지 않는 미응축가스는 버퍼탱크와 미스트 분리기를 거쳐 열분해 공정의 가스버너 연료로 사용됨.



[그림 2] 열분해유 제조공정 계략도

4-2. 재해발생 과정 및 작업

○ 재해발생 과정

- 현장 CCTV화면과 동료작업자의 진술을 바탕으로 한 재해 발생 과정

※CCTV 화면에 나오는 날짜는 셋팅문제로 실제와 맞지 않으나 시간은 실시간임을 확인

- 08:00경 : 주간조 출근하여 야간조와 교대함
 - 12:00경 : 열분해로 2호기의 버너 가동을 시작
 - 13:00경 : 1호기 열분해로 버너 가동 정지 후 냉각시작
 - 15:00경 : 3호기 열분해로 내 잔류 슬러지 배출을 시작
 - 21:00경 : 2호기 ℃ 승온한 상태에서 버너 정지
 - 21:40경 : 3호기의 냉각(℃이하)이 완료되어 3호기 원료 투입구 볼트를 풀기 시작
- ※투입구를 개방한 시간으로 3호기의 버너 정지시간을 추측해보면 열분해가 완료되고 로 냉각되기까지 12시간이 걸리므로 3호기는 9:40경 버너 가동을 중지한 것으로 추정됨

- 22:05 30" : 3호기의 투입구를 지게차를 이용하여 개방함(사진 1. 참조)
- 22:05 32" : 투입구 개방 후 2호기 버너 방향으로 이글거리는 가스 흐름이 관찰됨(사진 2. 참조)



[사진 1] 지게차를 이용한 투입구 개방



[사진 2] 3호기 문 개방 후 2호기로 방향으로의 가스 흐름

- 22:05 41" : 2호기 하부 버너부분에서 불길의 시작(사진 3/4. 참조)



[사진 3] 2호기 버너 불길시작



[사진 4] 2호기 버너 불길시작

- 22:05 50" : 3호기 투입구에서 폭발(사진 5. 참조)
- 22:06 50" : 폭발 이후 1분여간 3호기 내부에서 지속적 연소(사진 6. 참조)



[사진 5] 3호기 투입구에서 폭발



[사진 6] 폭발 이후 1분여간 3호기 내부에서 지속적 연소

4-3. 재해발생 원인 물질 및 설비

○ 열분해가스

[표1] 물리화학적 특성

물질명 (CAS 번호)	폭발 하한	폭발 상한	인화점 (℃)	발화점 (℃)	밀도 (공기=1)	구성비율 (%)
열 분 해 가 스	메탄 (74-82-8)	5	15	자료없음	537	0.554
	에탄 (74-84-0)	2.7	36	-136	490	1.05
	프로판 (74-98-6)	2.1	9.5	-105	450	1.52
	부탄 (106-97-8)	1.8	8.4	-60	365	2.1
	펜탄 (287-92-3)	1.5	7.8	-40	260	2.42

※ 열분해가스는 상온에서 응축되지 않는 가스로 이를 포집하여 열분해로 가열을 위한 가스버너 연료로 사용함

- 열분해가스는 구성비율로 추정해 볼 때 메탄을 제외한 나머지(%)는 가스밀도가 공기보다 무거워 누출 시 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄은 바닥으로 가라앉아 확산됨.

○ 열분해로(Batch type)

[표2] 장치 및 설비 명세

장치명	내용물	재질	용량 (mm, m ³)	압력 (Mpa)	온도 (℃)	비 고
열분해로	Flue Gas		2,600*8,300 (89.8m ³)			

* 운전온도 : 제출된 공정안전보고서상의 운전온도 보다 실제 더 높은 온도에서 운전함(운전일지 참조함)

※ 가열로 구성품 : 단열재 내부마감, 오일버너(열분해유), 가스버너(열분해가스), 파일롯버너(LPG)

4-4. 조사확인내용

○ 열분해로 3호기 원료 투입 작업

- 사고 당일 3호기는 약 10:00경부터 열분해작업이 끝나 냉각을 시작하였고 15:00경 열분해로 내 잔류 슬러지 배출을 시작하였음.
- 21:40경 잔류 슬러지 배출이 끝나고 약 12시간의 냉각을 거쳐 가열로 내부가 ℃ 이하가 되어 투입구 도어의 볼트를 풀고 도어 개방을 준비함.
- 도어 개방에는 도어의 무게가 무거워 도어 손잡이와 지게차 포크에 슬링 벨트를 연결하고 지게차를 뒤로 후진하여 개방을 진행함.
- 이때 좌측에 위치한 2호기는 사고 당일 12:00경부터 버너 가동을 시작하여 ℃ 까지 승온한 뒤 21:00경부터 3호기 투입구 개방작업에 집중하기 위해 오일 및 가스버너* 가동을 중지한 상태임.

* 버너 1set에는 Pilot Burner, Oil Burner, Gas Burner로 구성되어 있는데 이중 Oil Burner, Gas Burner의 가동만 중지하였고 열분해시 발생하는 미응축 가스는 가열로에서 연소 처리해야 하므로 Pilot Burner는 중지시키지 않고 내부에 불꽃이 살아있는 상태임. (사진7 참조)

- 투입구를 개방하자 다량의 탄화물(Char, Cokes 등) 분진과 가스가 섞여 급격히 외부로 누출되었고 외부 기류를 타고 2호기 쪽으로 이동하였으며 약 10초 후 2호기 하부 버너 부분에서 원인 미상의 폭발이 발생함. (사진8 참조)



[사진 7] 열분해로 및 가열로



[사진 8] 2호기 하부 버너 사진

○ 사고 열분해로 운전절차 및 운전상황 검토

- 원료 투입을 위한 투입구 개방작업은 안전운전절차서 상 ‘충분한 냉각(℃이하) 후 슬러지를 완전히 배출하고 개방’ 이라고만 기술되어 있어 내부에 인화성가스와 탄화물 분진이 존재함에도 이를 제거하는 조치에 대한 내용이 없어 ℃이하로 냉각만 되면 별도의 조치 없이 개방작업을 실시하고 있음.
- 또한 안전운전절차서에는 한 조에 3명씩 3조 3교대로 근무를 원칙으로 하고 있고 한 조가 1기의 열분해를 단독으로 운전하는 경우에 대한 운전 절차만 기술되어 있으며 같은 장소에 있는 3기의 열분해로의 동시 운전에 대한 운전 절차나 주의사항은 없는 상태임.

*** 현재 한 조에 3명의 근로자가 2조 2교대로 운영 중임.**

- 통상적으로 같은 장소에 있는 3기의 열분해로는 열분해과정에서 서로 영향이 없도록 1기의 열분해가 완료되고 냉각되면 다음 설비를 작동시키는 것이 자체적인 작업절차라고 진술하였으나 사고 당일 열분해로 1,2,3호기의 가동상태를 보면 12:00경 1호기의 열분해가 진행 중인 상황에서 2호기를 동시 가동하였고 3호기 투입구를 개방하려 했던 21:40경 2호기는 Pilot Burner가 켜져 있고 온도도 ℃까지 상승되어 있는 등 무리한 동시 가동으로 화재·폭발 위험에 노출된 상태로 작업하였음.

【 통상적 작업절차 (참고:참고인조서) 】

- (1) 1호기에 원료를 투입하고 오일버너를 점화시켜 가열(약 6시간)
- (2) 오일버너를 멈추고 가스버너를 사용하여 내부온도 380℃까지 가열 및 유지(약 6시간)
- (3) 가스버너 OFF 후 냉각을 시작하고 내부온도 100℃정도로 낮아지면 2호기 가동 시작(약 12시간)
(1호기 가동 후 약 24시간 이후 2호기 가동)
- (4) 2호기도 1호기와 동일한 과정을 수행하고 24시간 후 3호기 가동
- (5) 3호기도 동일한 과정을 수행하고 3호기까지 냉각이 완료되면 1호기, 2호기, 3호기의 전면 투입구를 개방하여 내부 잔재물 제거 후 다음 원료 투입을 수행
(통상적으로 1호기 가동을 시작으로 3호기까지 열분해를 끝내면 약 72시간이 소요됨)

- 종합해 보면 안전운전절차서에는 투입구 개방작업 시 ℃ 이하에서 개방하는 것으로만 기술되어 있고 내부 잔류 열분해가스를 제거하는 조치내용이 없으며

한 조가 1기의 열분해로 운전에 대한 절차만 기술되어 있고 2기 이상의 열분해로
 동시 운전에 대한 절차나 주의사항 등이 없어 같은 장소에 있는 3기의 열분해로가
 정확한 작동 절차나 주의사항없이 무분별하게 동시 운전되고 있음.

4-6. 화재사고 발생 원인분석(추정)



화재·폭발이 발생하기 위해서는 가연물과 공기(산소)가
 화재·폭발분위기를 형성하고 점화원이 공존해야 하
 므로 이를 기준으로 다음과 같이 추정함

가. 가연물

○ 열분해가스

- 가연물로 추정되는 열분해가스는 탄소 결합이 1~5개인 가스로 상온에서 응축이
 되지 않고 가스상으로 존재하는 상태인 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄 등으로
 구성되어 있음.
- 열분해로 투입구를 개방했을 시 바닥을 타고 2호기 버너방향으로 이글
 거리는 가스흐름이 발생한 것을 볼 때 열분해가스 중 가스밀도가 공기
 보다 높은 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄 등(구성비율 약 %)이 바닥으로 가라앉
 아 확산되었을 것으로 추정됨(사진 2. 참조)

나. 공기(산소)

○ 투입구 개방

- 열분해가 완료되고 내부온도 약 $^{\circ}\text{C}$ 에서 투입구를 개방하여 외부(당시기온
 약 20°C)와의 온도차로 인한 강한 기류가 발생하여 대기중의 산소와 희석
 되면서 빠르게 확산 되었을 것으로 추정됨

다. 점화원(추정)

점화원은 2호기 Pilot Burner 불꽃, 자연발화, 정전기 방전으로 추정됨

○ (추정 1) 2호기 Pilot Burner 불꽃

- 2호기 하부 가열로 내부는 비어있고 중간 격벽이 없이 뚫려있는 직육면체의
 구조로 버너 4기가 측면에 꽃혀있으며 버너가 설치된 측면의 점검구에는

틈새가(사진9 참조) 존재하여 외부의 가스가 내부로 유입될 수 있는 구조임.

- 또한 가열로 내부 버너의 연소 가스는 후단의 Fan에 의하여 Stack으로 배출되는 구조로 내부에 부압이 걸리는 상태임.
- 사고 당시 Pilot Burner는 점화 불꽃이 버너 내부에 켜져 있는 상태로 점검구 틈새를 통해 내부로 유입된 가스에 점화원으로 작용하였을 것으로 추정됨.



[사진 9] 2호기 하부 가열로 점검구 사진

○ (추정 2) 자연발화

- 열분해로는 회전식 Rotary Kiln 형식으로 하부 가열로 버너의 불꽃이 원통형로의 표면을 약 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하여 승온시키는 형식으로 운전온도는 $^{\circ}\text{C}$ 로 규정하고 있으나 운전일지로 보았을 때 보통 최대 $^{\circ}\text{C}$ 정도까지 승온시키는 것으로 확인됨.
- 2호기는 사고 당일 12:00경부터 버너가동을 시작하여 사고 1시간 전 21:00경까지 9시간가량 버너를 가열하여 열분해로 내부의 온도를 $^{\circ}\text{C}$ 정도까지 승온 후 버너를 정지시켰다고 진술한 것으로 보았을 때 2호기 하부 가열로의 내부 온도는 약 $^{\circ}\text{C}$ 불꽃으로 열분해로를 승온시키는 중이었던 만큼 상부 열분해로의 온도인 $^{\circ}\text{C}$ 보다 훨씬 높은 온도이고 내부 전체가 단열재로 마감되어 있어 냉각

도 상당히 느리게 진행되었을 것으로 추정됨.

- 이러한 2호기 하부 가열로 내부의 높은 온도는 점검구 틈 등을 통해 유입된 열분해가스 중 발화점이 낮은 구성성분(펜탄)이 자연발화를 일으켰을 가능성이 있음.

※ (펜탄) 열분해가스 구성비율 : %, 폭발하한:1.5%, 발화점:260℃

○ (추정 3) 정전기 방전

- CCTV 상으로 열분해로 외부로 누출된 물질은 열분해가스 외에도 폐 플라스틱의 열분해 반응 완료 후 생성된 내부 탄화물 분진도 함께 누출되어 가스와 함께 부유하는 것을 확인할 수 있음.
- 사고 당일 기상 관측자료 상 습도가 93%로 높으나 탄화물(Char, Cokes 등)은 탄소 함유량이 높고 수분이 거의 없는 매우 건조한 상태이고 ℃의 높은 온도로 인해 부유하던 분진이 충돌대전 등의 정전기에 의한 폭발이 발생하였을 가능성이 있음.

※사고 당시 2024.09.25. 22:00 ○○○ 기상청 관측자료 기온 20.4℃/습도 93%

○ 결론

- CCTV 영상을 근거로 ‘추정 1의 2호기 하부 가열로 내에 있는 Pilot Burner 불꽃’이 점화원으로 작용하였을 가능성이 가장 높을 것으로 추정함

5. 조사자 의견

5-1. 재해발생 원인

가. 열분해 잔재물 및 잔류가스 누출

- 안전운전절차서 상에는 열분해 완료 후 투입구 개방 시에는 충분한 냉각 및 배출구를 통해 슬러지를 완벽히 배출하고 개방하도록만 기술되어 있고 내부는 환기, 치환 등을 설비가 없어 비응축 가스 및 잔재물(Char, Cokes 등)이 외부로 누출됨.

나. 점화원 추정

- 이번 폭발사고의 점화원으로는 ① 가열로 내부 Pilot Burner의 불꽃, ② 가열로의 내부 발화점 이상의 고온의 상태, ③ 정전기로 추정되며, CCTV 영상을 근거로 2호기 하부 가열로 내에 있는 Pilot Burner 불꽃이 점화원으로 작용하였을 가능성이 가장 높을 것으로 추정함

다. 안전운전절차서 작성 미흡 및 절차 미준수

- 안전운전절차서는 투입구 개방 시 내부의 열분해가스를 제거하는 조치에 대한 내용이 없어 투입구 개방 시마다 가스가 누출되고 있으며, 한 조에 3명의 근로자가 1기의 열분해로를 단독으로 운전하는 경우에 대한 운전 절차만 기술되어 있고 열분해로 동시 가동 시 열분해로를 어떤 조건에서 어떻게 작업하여야 하는지에 대한 내용이 기술되어 있지 않음.
- 통상적 작업절차 상 같은 장소에 있는 3기의 열분해로는 열분해과정에서 서로 영향이 없도록 1기의 열분해가 완료되고 냉각되면 다음 설비를 작동시키는 것이 자체적인 작업절차라고 하나 명확히 문서화되어 있지 않아 무분별하게 동시에 가동하고 있음.

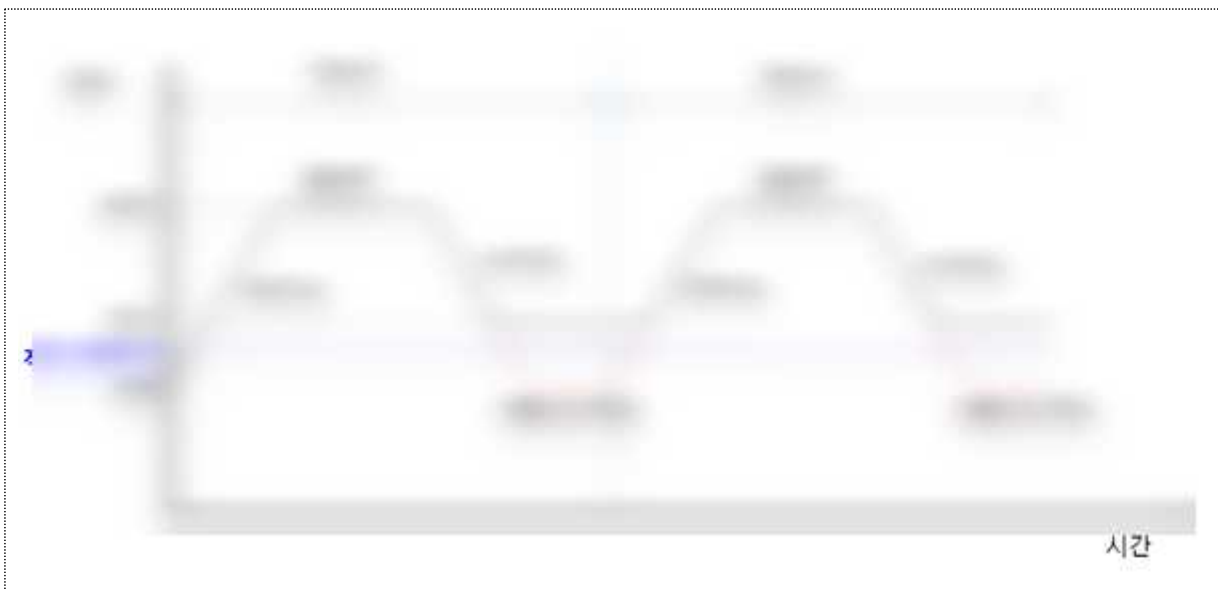
5-2. 재해예방 대책

가. 폭발위험분위기 형성 방지 조치

- **(가연물 관리)** 투입구 개방 시 외부로 누출된 열분해유 잔재물(Char, Cokes 등) 및 잔류가스 등이 이번 사고의 가장 주된 원인이므로 개방 전 안전한 방법으로 제거하는 등의 방법으로 투입구 밖으로 누출되지 않도록 확실한 조치를

하여야 함.

- **(산소 관리)** 열분해로는 저산소로 운전되는 설비로서 투입구 개방 시 외부 공기(산소) 유입으로 화재·폭발 위험이 있으므로 질소 등 불활성 물질로 치환(purge)하는 등의 조치를 하여야 함.
- **(온도 관리)** 열분해로는 회분식(Batch) 공정으로 냉각(Cooling) 후 승온(Heating) 작업을 하여야 하는 공정 특성(그림3 참조) 상 작업의 시간 단축, 에너지 절감(아래 그림 붉은색 점선 구간) 등의 사유로 충분한 냉각 없이 작업을 수행할 가능성이 있고, 이때 높은 온도 즉, 외부와의 온도차로 인한 기류 생성으로 가스 및 분진 누출 등의 위험이 있으므로 화재폭발위험이 없는 적절한 투입구 개방 온도를 설정하고 이를 철저히 준수하여 투입구를 개방 하여야 함.



[그림 3] 작업단계별 운전(온도) 조건

- **(점화원)** ①가열로 내부의 Pilot Burner의 불꽃과 ②가열로 내부의 고온의 기체와 발화점이 낮은 구성성분(펜탄)의 접촉에 의한 자연발화 등 점화원은 고정부와 회전부가 있는 설비 특성상 완벽하게 밀폐시켜 접촉을 차단하기 어려우며, ③ 정전기 또한 온도, 습도 등 다양한 환경적 요인으로 점화원을 제어하기 어려우므로 화재·폭발 3요소 중 가연물과 산소 제어를 통해 화재·폭발 위험 분위기가 형성되지 않도록 조치하는 것이 중요함.

나. 명확한 안전운전절차서 작성 및 준수 철저

- 안전운전절차서에 투입구 개방작업 전 가연물 제거, 내부 치환, 온도관리와 같은 방호조치를 완료한 후 상세한 작업절차 내용을 작성하여 근로자에게 교육하고 이를 철저히 준수하도록 관리감독 하여야 함.
- 또한 열분해로를 동시 운전하려면 어떤 조건에서 어떻게 작업하여야 하는지 안전운전절차서에 명시되어 있지 않아 근로자가 정확한 운전절차를 알 수 없는 상태이므로 이에 대한 명확한 안전운전절차서를 작성하고 이를 근로자에게 교육 및 준수여부를 관리감독 하여야 함