

RTO 방식 대기오염방지 시스템의 화재·폭발 방지에 관한 연구

- A Study on Prevention of Fire and Explosion of RTO Type Air Pollution Control System -

황순용 *

Hwang Soon Yong

차순철 *

Char Soon Chul

이근원 **

Lee Keun Won

강경식 ***

Kang Kyung Sik

1. 서론

우리나라는 화학산업이 빠른 속도로 발전하는 과정에서 심각한 환경오염과 많은 대형재해를 일으킨바 있으며, 민원의 대상이 되어왔다. 특히, 대기오염은 국지적인 문제가 아니라 국가 간의 심각한 사회적 문제로 대두되면서 대기오염 물질에 대한 법적 규제가 급속도로 강화되고 있다.

따라서 많은 사업장들이 강화되는 환경법규에 대해 능동적으로 대처하기 위하여 대기오염 방지시설을 신설하거나 기존의 설비의 확장을 추진하고 있다.

이러한 상황 하에서 안전성이 확보되지 않은 VOC 저감설비 등의 대기오염방지설비를 설치하는 경우 화재·폭발사고의 위험성이 있으며, 실제로 RTO 방식의 소각설비에서 화재·폭발사고가 발생한바 있다. 또한 대부분의 대기오염방지설비는 대규모의 위험물질 저장탱크나 이들을 원료로 사용하는 공정시설과 연계되어 있어 대규모 화재·폭발사고나 인근 주민 및 환경피해를 일으키는 중대산업사고로 발전될 수 있는 위험성이 있다.

* 명지대학교 산업공학과 박사과정, 화공안전기술사

** 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터 위험성연구팀장

*** 명지대학교 안전경영연구소 소장

특히 RTO(Regenerative Thermal Oxidizer) 방식 소각시스템은 처리효율이 높고 설비 유지관리 및 처리비용 저렴 등 많은 장점이 있으나 고온에서 산화처리를 하므로 화재·폭발 등 잠재위험성이 상존하고 있다.

따라서 본 연구에서는 RTO 설비의 원리 및 구조적 특성을 안전성 측면에서 고찰하였으며, 국내의 RTO 방식 소각설비 제작업체를 대상으로 기술수준 및 안전시스템 적용에 관한 실태를 조사하는 한편 RTO 방식의 소각설비에서 발생한 폭발사고 사례에 대한 사고원인 분석결과를 중심으로 RTO 설비의 위험성과 문제점에 대한 개선대책을 제시하고자 한다.

2. 대기오염물질의 종류 및 배출원

대기오염이란 바람직하지 못한 물질이 유해한 영향을 끼칠 만큼 대량으로 대기 속에 존재하는 것을 말한다. (Noel De Nevers 1999)¹⁾. 이런 바람직하지 못한 물질들을 오염물질이라고 한다.

대기환경보전법상 대기오염물질은 질소산화물, 황산화물, 암모니아, 탄화수소 등 모두 52종류이고, 황산화물은 SO_x로 표기되며 SO₂ 또는 SO₃로 주 발생원은 석탄이나 석유와 같은 화석연료의 연소에 의하여 방출되고, 질소산화물은 NO_x로 표기되며 NO, NO₂, NO₃ 등으로 대부분이 연료의 연소시에 발생하는 NO로서 약 90%를 차지하고 나머지는 NO₂, 로서 자동차 연료의 연소시에 주로 발생된다.

한편 소각식 대기오염방지시설의 주 처리대상물질인 휘발성 유기화합물질(VOCs)²⁾은 주로 유기용제나 석유화학제품 등으로 휘발유, 벤젠, 아세트알데하이드 등이며, 연간 64.7만톤 정도가 배출되고 있으며, 배출원은 일반적으로 자동차에서 40%, 용제를 사용하는 도장시설에서 40%, 주유소 및 석유 저장·출하시설에서 10%를 차지하며, 세탁소 및 기타 배출원에서 나머지 10%를 배출한다.

3. RTO 방식 축열식 소각로의 구조 및 원리

축열식 소각로는 축열재를 열교환 매체로 사용하여 배기가스의 폐열을 최대한 회수하여 이를 흡기가스 예열 및 산화에 이용하는 것이며, 축열재는 폐열회수를 극대화하기 위하여 표면적이 넓은 세라믹(Ceramic)을 이용한다. 축열과 냉각이 교대로 이루어지게 하는 방법으로 Bed Type과 Rotary Wing Type이 있으며, 처리대상 가스가 연소실로 유입되기 전에 고온의 세라믹 예열층을 통과한 후 연소실로 들어가 750~1000℃에서 고온 산화되고 다시 폐열을 흡수하는 세라믹 층을 통과한 후 대기로 배출된다.

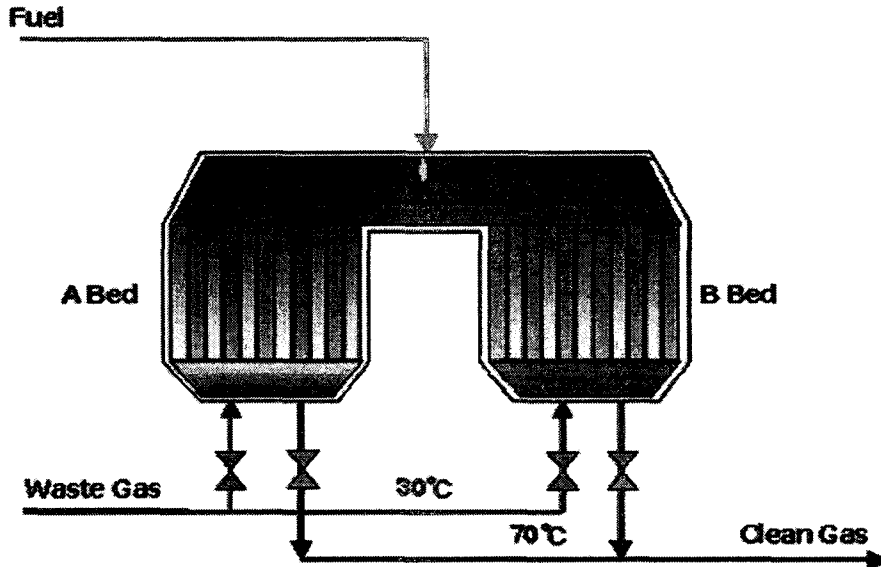
여기에서 2-Bed RTO System을 그림으로 설명하면, 운전 초기 소각로 내의 Ceramic (그림 1의 A, B)의 상층부의 온도가 소각로 운전온도가 되도록 가열한 후, 처

1) Noel De Nevers, Air Pollution Control Engineering(1999) McGraw-Hill

2) VOCs : Volatile Organic Compounds

리전 가스를 A → B 방향으로 투입한다(그림 1).

가스의 온도는 A Ceramic(축열층)을 통과하면서 그 온도가 소각로 온도까지 예열되며 가스에 포함된 유기가스는 산화되기 시작하여 적절한 체류시간을 갖는 상부 Chamber를 통과하면서 모든 유기물이 고온에 의해 산화처리 된다.



[그림 1] 2-BED RTO 시스템 (A-Cooling , B-Heating)

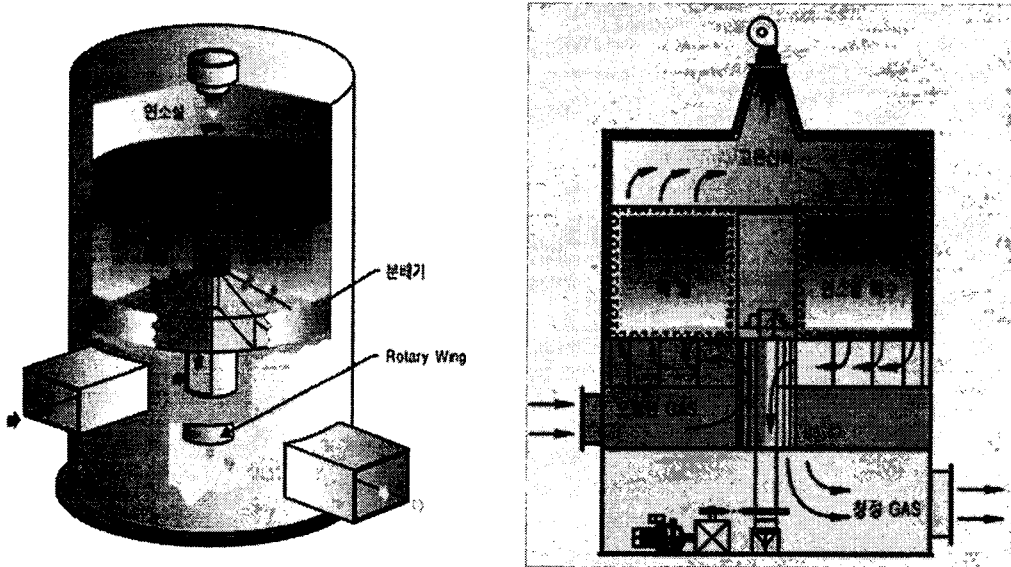
처리된 고온의 가스는 B Ceramic을 통과하며 B Ceramic에 거의 모든 열을 배출하고 A Ceramic 입구 온도보다 30~40°C 높은 온도까지 냉각된다.

일정시간이 경과하여 A Ceramic이 흡입가스의 예열로 냉각되고, B Ceramic이 배기가스에 의해 가열되면 가스 투입 유로를 B→A로 바꾸며, 일정시간(1.5분~3분) 간격으로 Switching 운전을 반복함으로써 가스 소각에 필요한 에너지 소비를 최소화한다.

한편, 최근에는 2-Bed Type RTO의 Bed 전환시 발생하는 미연소 가스를 효과적으로 제거하는 하나의 방법으로 Rotary Wing Type RTO가 많이 사용되고 있다. 기존 축열방식을 탈피하여 풍향의 전환을 Damper를 대신하여 Rotary Wing의 구동을 통하여 회전하면 연속적으로 VOC 등 처리대상가스의 공급이 이루어져 항상 축열층의 절반은 예열되고, 반쪽은 열을 회수하는 역할을 연속적으로 수행하여 완전연소가 이루어지는 일체형 설비이다. 처리 대상가스가 연소실로 유입되기 전에 세라믹 열교환장치에 의해 예열되고, 예열층을 통과한 가스는 연소실로 들어가 750°C~850°C 정도로 고온산화되어 유기화합물은 완전연소가 이루어지며 산화반응이 끝난 고온의 처리가스는 폐열을 흡수하는 세라믹층을 통과하면서 축열이 이루어져 새로 유입되는 가스에 이 에

너지를 공급한다.

Rorary Wing Type은 풍향의 전환을 Rorary Wing의 구동으로 이루어지기 때문에 기존의 Damper 방식에서 야기되는 미처리 가스 문제, 압력변동 및 다수의 Damper 작동에 의한 고장율을 방지하여 VOC 제거 효율을 항상 일정하게 유지시켜 주며, Rorary Wing의 구동주기를 달리하여 열회수 효율을 조절, 열손실의 극소화 운전이 용이하며, 설치공간도 상대적으로 적어 유지관리에도 유리하다. 그러나 ABS 수지 압출기 등에서 발생하는 악취제거 목적으로 사용하는 경우에는 분배기 및 세라믹층에 축적된 가연물질에 의해 내부화재가 발생하는 경우가 종종 있으며, 이와 관련하여 폭발 사고가 발생한 사례도 있으므로 충분한 안전대책이 요구된다.



[그림 2] Rotary Wing Type RTO System

4. RTO 방식 소각설비의 폭발사고 사례원인 분석

2006년 5월 23일 여수 소재 (주)○○에서 ABS 및 PS수지 압출공정에서 발생하는 흡과 악취를 제거하기 위해 설치된 RTO 내부에서 폭발이 발생하여 폭발으로 인입닥트 중에 설치된 응축물 수집기(Trap)를 포함한 배관설비 일부가 파열되고 공장동 공장동 유리창 일부가 파손되는 사고가 발생하였으나, RTO로 인입되는 처리대상가스의 가연성가스의 농도가 가연성가스 측정기로 감지되지 않을 정도로 미약하여 폭발이 발생할 수 있는 조건이 되지 않으므로 폭발이 일어날수 있는 조건이 될 수 있는 원인을 찾기 위하여 인입닥트 중에 생성되는 응축물질을 채취하여 산업안전보건연구원 화학

물질안전보건센터에서 인화점시험기, 폭발한계 측정장치 및 열안정성 시험기 등의 실험장비를 이용하여 위험성 시험 및 평가를 실시하였다.

① 사고일시 : 2006년 5월 23(화) 13:40분경

② 재해현황

- 인적피해 : 없음

- 물적피해 : RTO 덕트 중 응축물 수집기 파열 및 공장동 유리창 일부 파손

③ 내고내용

- ABS수지 및 PS수지를 후가공 처리하는 사업장으로서 2005년 9월에 공장을 신설하였으며, 공정중에서 발생된 흠 등이 근로자에게 폭로되는 것을 예방하고, 악취가 확산되는 것을 방지하기 위하여 압출공정에 국소배기장치를 설치하고 이를 고각처리하기 위하여 RTO 설비를 설치하여 사고일 현재까지 약 7개월 정도 가동하여 오던 중,
- 2006년 5월 23일 11:00시경 작업자가 RTO 설비 내부 하단의 화재로 배관라인 및 설비의 온도가 상승한 것을 발견하고, RTO 설비에 설치된 버너(Burner)를 끄고, 공급되는 유입가스의 양을 줄이기 위하여 송풍기 속도를 6단에서 3단으로 낮추어 운전함.

- 폭발사고 발생 직전까지 RTO 설비 하단은 공정에서 발생된 흠의 응축물질이 화재로 가열되면서 발생된 유증기(아크릴로니트릴, 스티렌모노머 성분 등이 포함됨)에 의해 폭발하한계 이상의 폭발분위기를 형성하였을 것으로 추정되며, RTO설비와 관련된 점화원(화염, 복사열 등)에 의해 폭발이 일어남.

- 폭발시 발생된 압력 및 충격파에 의해 국소배기용 덕트에 설치된 응축물 수집기(Trap : 내용적 약 100ℓ)의 용접부가 파열되면서 공장동 유리창 등이 파손됨.

④ 사고 원인

- 처리대상물질이 화재나 폭발을 일으킬 수 있는 폭발분위기를 형성 할 가능성이 없는 것으로 판단하여 RTO 설비를 정상상태만을 고려하여 설계함으로써 RTO 설비 내부화재 등 설비 이상시에 대한 안전조치가 미흡하였음.

- 폭발사고 발생 전날 및 당일 사고 발생 3시간 전에 내부화재가 발생하였으나, 이에 대한 원인규명 및 대처 등 설비 이상시에 대한 초기 대응이 미흡하였음.

⑤ 사고원인 물질에 대한 화재·폭발 위험성 시험 결과 및 평가

- 시험물질은 인화점 190℃이상에서 점화원(불꽃)에 의해 점화될 수 있는 물질이었다. 인화점 부근(190℃~200℃)에서 인화된 가스는 성분 분석결과 아크릴로 니트릴 및 벤젠 등과 같은 가연성 가스였다.

- 인화점에서 발생한 가스가 공기와의 혼합가스를 형성 할 경우 시험물질의 분자량을 50 g/mol로 가정하면 폭발하한계(190℃)는 7.24 %이고, 분자량이 200g/mol인 경우로 가정하면 폭발하한계(190℃)는 1.80 %이었다.

- 발화점은 385℃로 측정되었다.

- 열안정성 시험결과는 300℃로 시험물질을 가열할 경우 분해열로 인하여 자체적으로 발열하는 현상은 보이지 않았다. 시험물질의 온도가 250℃이상부터 급격한 압력상승을 나타내었는데 300℃까지 가열하였을 때 6.7Bar까지 압력이 상승하였다. 이와

같은 결과로부터 알 수 있는 것은 만약 밀폐용기에 시험물질을 담고 외부열원에 노출되어 시험물질이 250℃ 이상으로 가열된다면 급격한 압력상승으로 인하여 폭발이 발생할 수 있다는 것을 보여준다.

이상과 같은 분석 결과로부터 본 폭발사고는 사고원인에서 추정된 바와 같이 RTO 설비 내부의 화재로 인하여 RTO 하단의 응축물의 온도가 190℃ 이상이 될 때까지 가열되면서 발생한 가연성 가스가 폭발하한계 이상으로 혼합가스를 형성하고 불꽃 등에 의해 점화되어 발생했다고 추정할 수 있다.

5. RTO 설비의 주요 문제점 및 대책

5.1 설계기준 및 위험성평가

① 현황 및 문제점

- 처리대상가스의 조성 및 위험특성 등 물질의 잠재위험성에 대한 분석과 평가가 미흡함.

- 공정위험성 평가결과를 반영한 설계기준 적용 및 안전운전 절차서 미흡

② 개선대책

- 처리대상 물질에 대한 조성을 파악하고, 물질안전보건자료(MSDS) 확보 및 물질 위험 특성에 대한 조사 및 분석

- 공정위험성평가를 실시하고 평가결과를 설계 및 제작, 운전절차서, 비상조치계획 등에 반영

- 저장탱크의 Vent 등 배출원의 배출용량 등 정확한 처리용량 계산과 이에 상응한 설계기준 적용

5.2 공정설비 및 안전장치

5.2.1 RTO 인입가스 농도감지기 설치

① 현황 및 문제점

- VOC 등 가연성가스가 순간적으로 RTO로 유입될 경우 RTO 하부 또는 연결덕트내부에 화재 또는 폭발이 발생할 수 있다.

② 개선대책

- RTO 인입측에 VOC 등 가연성가스의 농도를 감지하는 감지기(센서)를 설치하여 폭발하한계의 25%를 초과하면 즉시 RTO로 유입되지 않도록 차단함과 동시에 RTO를 퍼지 또는 Cooling Down 시키고 고농도 증기는 비상배출관을 통하여 배출시키거나 인입측에 질소 또는 청정공기를 주입하여 폭발농도 이하로 제어할 수 있도록 시스템을 구축하여야 한다.

5.2.2 파열판 또는 폭발방산구 설치

① 현황 및 문제점

- RTO 또는 연결 닥트내부에서 폭발이 발생할 경우에 폭발압력을 배출할 수 없으면 전공정설비의 파손 등 대형사고로 발전될 수 있다.

② 개선대책

- 설비 규모 및 폭발 발생 위치에 따른 배출량에 따라 파열판 또는 폭발방산구의 형식과 크기를 결정하여 다음과 같은 필요개소에 설치한다.

- 비정상 상태에서 가스농도가 높아 폭발이 발생할 수 있는 닥트 중 굴곡지점 또는 응축물 분리기 등 부속설비가 설치된 곳과 RTO 전단 위치
- 보조연료 버너가 설치된 연소실 등

5.2.3 화염방지기 설치

① 현황 및 문제점

- 각종 탱크에서 발생하는 VOC 등을 처리하기 위해서는 여러개의 저장탱크를 닥트로 연결하여 하나의 RTO로 소각처리하는 경우가 대부분이며, 이때 RTO 내부 등 어느 한곳에서 화재나 폭발이 발생하면 모든 탱크로 전파될 수 있다.

② 개선대책

- 화재 또는 폭발 발생시 화염전파를 방지하기 위해서 RTO 인입닥트, 가지닥트 및 저장탱크의 Vent Line에는 화염방지기를 설치하여야 한다. 한편 화염방지기는 폭발에 의한 고압이 미칠 경우에는 화염방지기의 기능이 상실될 수 있으므로 폭굉용 화염방지기(Detonation Arrestor)를 설치하거나 폭발과압이 미칠 수 있는 곳에 파열판 등을 설치하여 화염방지기가 손상되는 것을 방지하여야 한다.

5.2.4 가연물 축적 방지 및 온도감지장치 설치

① 현황 및 문제점

- ABS 및 PS 수지 압출기 등에서 발생하는 악취제거 목적으로 사용하는 RTO 시스템의 경우에는 인입 닥트, 분배기 및 세라믹 축열층에 가연물질 축적되어 RTO 내부에 화재가 발생하는 경우가 종종 있으며, VOC 처리설비 등 에서도 인입가스의 농도가 설계기준 이상으로 올라가 RTO가 파열되는 경우가 있다.

② 개선대책

- 인입가스에 포함된 응축가능 물질과 가연성 분진 등은 사전에 전처리 설비를 통하여 완전히 제거하거나 제거하기 어려운 경우에는 예열하여 공정중에 응축이 일어나지 않게 하는 등의 조치를 취하여야 하며, RTO의 인입측, 내부 및 출구온도 등을 지속적으로 감지하고, 온도가 설정치 이상이 될 경우에는 경보기 작동과 더불어 인입가스의 차단, 냉각시스템 가동 및 RTO 버너의 연료차단 등과 연동되도록 안전시스템을 구축하여야 한다.

6. 결 론

본 연구에서는 RTO 설비의 원리 및 구조적 특성을 안전성 측면에서 고찰 하였으며, RTO 방식의 소각설비에서 발생한 폭발사고 사례에 대한 원인분석을 통하여 RTO 설비의 위험성과 문제점을 도출하였으며, 이에 대한 개선대책을 제시하였다. 한편 RTO 방식 소각시스템은 처리효율이 높고 설비 유지관리 및 처리비용 저렴 등 많은 장점으로 신규 설치가 증가하고 있다. 그러나 현재 안전운전을 위한 관리 시스템과 각종 안전장치의 미비로 화재·폭발사고의 잠재위험성 이 높은 실정이다. 따라서 제작용체는 RTO 시스템 구성 및 안전설계에 반영하고, 사용업체에서는 안전운전절차 및 비상조치요령에 대한 교육 및 훈련을 통하여 안전조업을 할 수 있도록 RTO방식 대기오염방지 시설의 안전관리 및 시설기준에 관한 기술기준이 마련되어 이에 따른 설비제작 및 운영이 필요하다.

7. 참 고 문 헌

- [1] 구재학, 김문찬, 박상찬, 박태술, 대기환경장치설계Ⅱ, (2006) pp. 16
- [2] 김장호, 김석택, 유해가스처리공학, (2000) pp. 245~256
- [3] 이근원, 황순용, “수지 후처리공정 연소기의 폭발사고 원인규명 연구” 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, 2006.
- [4] 한국산업안전공단 전남동부지도원, “RTO 설비 폭발사고조사보고”, 2006
- [5] 한국산업안전공단, “소각법에 의한 VOC 처리설비의 안전대책”, 2003

저 자 주 소

황 순 용 : 서울시 강남구 도곡1동 895-8 역삼한신아파트 2동 801호

차 순 철 : 서울시 서초구 양재1동 64-2 양재대일빌라 2차 101호

이 근 원 : 대전시 유성구 문지동 104-8

강 경 식 : 경기도 성남시 분당구 정자1동 파크뷰아파트 611동 3103호