

RTO 설비의 특징과 안전대책

최근 도입되고 있는 축열식 소각장치(RTO)의 특징과 위험요인을 파악하여 안전운전과 손실방지에 도움을 주고자 소개한다.

1. 서언

대기환경보전법상 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds)은 탄화수소류 중 석유화학제품·유기용제 기타 물질로서 환경부장관이 관계기관의 장과 협의하여 고시한 물질로 정하고 있다.

VOC는 악성빈혈과 피부염, 말초신경장애 등을 일으키며 일부 물질은 발암물질로 알려져 있으며, 악취가 심하고 오존층을 파괴하여 관리대책이 요구되고 있다. 특히 VOC배출이 많은 도장산업 등의 산업분야를 중심으로 VOC배출저감을 유도하여 오존 파괴로 인한 스모그 발생을 억제하고 있다. 국내에서는 1996년 여천, 울산, 온산 등을 특별대책지역으로 정하였으며 2000년부터 서울, 인천을 비롯한 대도시를 대기환경규제지역으로 정하고 VOC 배출을 규제하고 있다. 주요 관리대상물질은 휘발성이 높은 벤젠, 톨루엔, 휘발유 등 37개 물질이며, 관리업종은 석유화학업, 유기용제업, 자동차정

비시설, 주유소 등 10개 업종이다.

그러나 아직 규제대상 업종별 세부관리기준의 보완과 VOC 배출·억제시설 추진 실적이 미흡한 상태이다.

VOC를 처리하기 위하여 현재까지 상용되었거나 개발 중인 제어기술로는 직접소각, 축매소각, 흡착, 흡수, 응축, 플라이어, 보일러/히터, 생물막, 막분리, 자외선산화, 코로나, 플라즈마 등 10여 가지나 된다. 그러나 이 기술들은 적용 가능한 공정조건(배출원, 유량, 필요한 유틸리티, 전처리), VOC특성(성분, 농도, 저해물질 등), 기타 조건(2차 오염도, 유지관리 등)이 각각 다르므로 이에 따라 적절히 선정되어야 한다.

최근 도입되고 있는 축열식 소각장치(RTO, Regenerative Thermal Oxidizer)는 단위장치로서 처리효율이 좋고, 유지관리가 용이하며, 에너지 소비가 적은 장점이 있어 많은 사업장에서 설치하고 있다. 이러한 RTO 설비는 환

경설비로 인식되어 안전분야에서 소홀히 하여 왔으나 고온에서 가연성가스를 취급한다는 점을 고려하면 근본적으로 화재 및 폭발위험을 갖고 있는 것이다. 그러나 RTO 설비의 설치 증가에 따른 위험분석이 없으며, 새로운 설비에 대한 운전 미숙으로 인하여 예상치 못한 사고가 발생하고 있다. 본 고에서는 RTO설비의 특징과 위험요인을 파악하여 안전 운전과 손실 방지에 도움을 주고자 한다.

2. 축열식 소각 방법

축열식 소각장치는 베드타입과 원형 로터리 타입이 있다. 베드 타입은 베드의 수에 따라 2-베드, 3-베드 혹은 5-베드 등으로 구분된다.

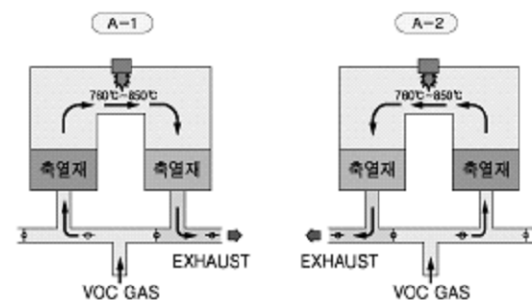
2.1 2-베드 시스템

운전 초기에 소각로 내의 세라믹 상층부 온도가 소각로 운전온도가 되게 가열한 후, 그림 1과 같이 VOC 가스를 좌측 베드에서 우측 베

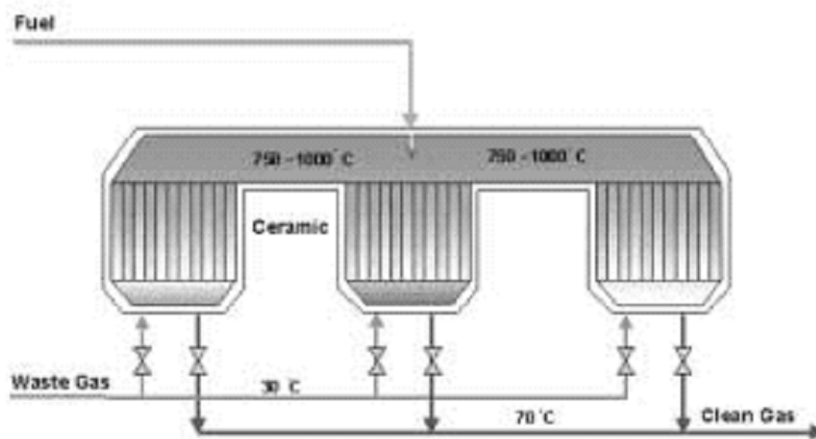
드로 투입한다. (A-1)

VOC 가스는 좌측 베드를 통과하면서 소각로 온도까지 예열되어 가스에 포함된 VOC가 산화되기 시작한다. 계속해서 상부 챔버를 통과하면서 모든 VOC가 산화처리 된다. 처리된 고온의 가스는 우측 베드의 세라믹을 통과하면서 거의 모든 열을 우측 세라믹에 전달하고 좌측 베드 입구의 온도 보다 50℃ 정도 높은 온도까지 냉각된다.

일정시간이 경과하여 좌측 베드의 세라믹이 흡입가스 예열로 냉각되고, 우측 베드의 세라믹이 배기가스에 의해 가열되면 가스 투입 경로가 우측에서 좌측으로 전환된다.(그림 A-2)



[그림 1] 2-베드 시스템의 VOC 흐름



[그림 2] 3-베드 시스템의 운전원리

이와 같이 몇 분 간격으로 VOC의 흐름을 전환하여 반복 운전함으로써 VOC 가스 소각에 필요한 에너지 소비를 최소화 할 수 있게 된다.

그러나 A-1상태에서 A-2상태로 흐름이 변환될 때, 좌측의 덕트와 축열재 내부에 미분해 VOC가스가 잔류하고 있어 사이클 교체시 순간적으로 미처리 가스가 배기되어 급격한 효율 저하 및 압력변화에 의한 맥동이 발생할 수 있게 된다.

2.2 3-베드 시스템

VOC 제거 효율을 높이기 위해 베드 수를 늘린 것으로 3-베드 시스템이 있으며 규모에 따라 5 혹은 7-베드 등이 있으나 동작 원리는 3-베드와 같다.

2-베드 시스템은 좌우 세라믹 베드가 예열과 열회수를 반복하는 반면 3-베드 시스템은 그림 2에서와 같이 별도의 세라믹 베드를 이용하여 예열 부분과 열회수 부분에 Purge 단계를 추가하므로 VOC 흐름이 전환될 때 배출되는 미반응가스를 줄일 수 있다.

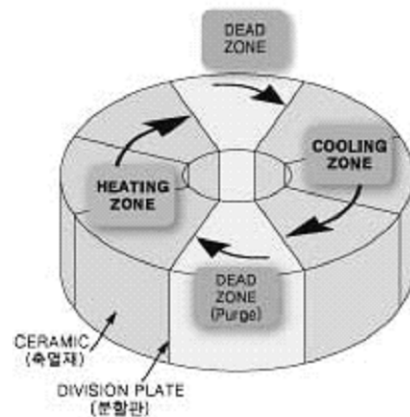
베드 수에 따라 규모가 커지는 단점이 있으나 처리 효율을 99%까지 올릴 수 있어 고농도의 VOC 가스를 처리하는데 적합하다.

2.3 회전 날개를 이용한 캔 시스템

댐퍼가 아닌 날개의 회전에 의하여 VOC 가스의 흐름을 전환한다. 원형으로 분할된 Cell로 연속적인 흐름이 이루어져 항상 축열층의 절반은 예열되고, 반쪽은 열을 회수하는 역할을 수행하여 완전연소가 이루어지도록 하는 시스템이다.

그림 3과 같이 축매층, 축열층 및 분배실은

여러개의 부채꼴 Cell로 나누어져 있으며, Rotary Wing이 회전하면서 연속적으로 반쪽은 예열이 되고, 나머지 절반은 열회수 역할을 순차적으로 한다. 이때 3-베드와 같이 Dead Zone을 두어 처리전 가스와 청정가스의 혼합을 방지하고, 처리되지 않은 가스는 공기 퍼지를 통해 산화처리 한다.



[그림3] 로터리 타입

3. 축열식 소각장치의 특징

축열식 소각의 기본 원리는 배기가스의 폐열을 최대한 회수하여 이를 흡기가스 예열에 이용하는 것이며, 폐열 회수를 극대화 하기 위하여 열교환기를 사용하지 않고 표면적이 넓은 세라믹을 이용하여 직접 열을 회수하는 방법을 사용한다.

일반 열교환기는 공기를 열교환 할 때 입출가스 온도차가 250℃ 내외로 매우 높고 사용 온도범위가 제한적이나, 세라믹을 이용한 축열식 소각장치는 사용온도가 1,000℃ 정도로 매우 높은편이며, 열 회수를 통하여 입구와 출구의 가스 온도차를 50℃ 내외로 관리할 수 있어

열회수율이 높은 장점이 있다.

RTO 설비의 특징은 다음과 같다.

(1) 연료 소비량

기존의 직접 소각법은 연소 온도 증가에 따라 연료 소비량이 많아지지만, 축열식은 고온에서 운전하여도 입출구 가스 온도차가 약 40~70℃ 정도가 될 때까지 열회수가 이루어지기 때문에 연료 소비량이 적다.

(2) 안정 운전과 장치 수명

대부분의 VOC 성분은 800~1000℃ 고온에서 직접 연소와 축열재 표면에서의 접촉연소로 완전히 산화 분해되고 가스의 양, VOC성분 농도의 변동 등에 따라 축열재의 온도가 변화하지 않아 안정된 연소가 가능하다. 또한 고온부에 금속재료를 사용하고 있지 않아 안정된 연소가 가능하며 장치는 열 산화에 대해서도 강하며 장치 수명을 유지할 뿐만 아니라 유지관리 비용이 저렴하다.

(3) 단순 구조

가동부분은 전환 밸브뿐이고, 구조도 간단하며, 열전달율이 높은 축열재를 채용하고 있기 때문에 압력 손실이 비교적 적어 동력비도 절약된다.

(4) NO_x 발생 감소

고온부의 축열재에서 VOC 성분이 열에 의해 연소되며 보조 버너의 열공급이 적기 때문에 대량 연료 버너 연소 등에서 볼 수 있는 국부 고온 연소가 없기 때문에 NO_x의 발생은 상당히 낮아지게 된다.

4. 축열식 소각장치의 위험 및 안전대책

RTO 설비는 휘발성 유기화합물을 고온에서 취급하고 있어 상시 화재 및 폭발위험성을 갖고 있다.

특히, 고농도의 휘발성 가스가 RTO 내로 유입되어 가스농도가 폭발하한계(Lower Explosive Limit)를 초과하게 되는 경우 사고가 발생하게 된다. NFPA에서는 폭발성 분위기를 형성하는 가스의 농도를 폭발하한계의 25% 이하로 유지하도록 하고 있다.

RTO 설비의 설치 및 안전운전 대책은 다음과 같다.

(1) 안전거리 및 공간 확보

RTO 설비는 다른 설비 혹은 건물과 충분한 안전거리를 확보하여야 한다. 또한, 2개 방향의 접근로가 확보되어야 하며 진입로는 차량 또는 장비가 접근할 수 있도록 충분한 공간을 확보한다.

(2) 질소 가스 purge system

고농도의 VOC가 유입되는 경우 비활성 성질을 갖는 질소 가스로 purge하여 화재 및 폭발을 방지할 수 있다. 공기를 주입하여 VOC 가스 농도를 희석하는 방법은 산소를 공급시켜 화재를 활성화시키는 역작용을 할 수 있으므로 화재시에는 사용이 되지 않도록 하여야 한다.

(3) 온도 및 압력 interlock system

온도 및 압력 이상시 제어 패널과 interlock이 되어 사고를 예방할 수 있도록 되어 있어야 한다. Interlock system의 설정값은 이론값과 운전경험을 통해서 얻은 값을 근거로 조정하여야 한다. 특히 일차 경보를 발할 수 있는 High 및 Low 값은 안전조치 시간을 고려하여 설정

하여야 하며 이들 값은 통제실에서 실시간으로 인지하여 제어할 수 있어야 한다.

(4) VOC 농도 감지기

고농도의 VOC 가스가 유입되는 경우 바로 감지하여 차단할 수 있도록 가스 감지기와 긴급차단밸브를 설치하여야 한다.

(5) Fire damper 설치

연소확대를 방지하기 위해 Fire damper를 설치한다.

(6) 과압 방출 장치

폭발시 발생하는 과압을 외부로 방출시키기 위해 Safety valve 및 Rupture disk를 설치한다.

(7) 긴급차단밸브

VOC가 배출되는 공정과 RTO 본체를 차단할 수 있는 긴급차단밸브를 설치한다.

(8) Limit switch

밸브 오동작으로 인한 가스 흐름에 이상 발생시 RTO 운전을 중단시키고 공정부분과 차단 되도록 Loop를 구성하여야 한다.

(9) Burner 안전장치

Burner에 충분한 공기가 공급되는 경우 버너가 작동되도록 하고 버너가 꺼져 있는 상태에서 LNG가 공급되지 않도록 정상적으로 작동되는지를 확인하여야 한다.

(10) LNG 가스 감지기

초기 예열용으로 사용하는 LNG(혹은 LPG) 감지기를 설치하여 누출여부를 확인하고 압력 차이가 발생하는 경우 LNG 공급을 차단하고, 화염이 없는 상태에서 LNG가 공급되지 않도록 하여야 한다.

(11) 이중 안전장치

VOC 가스를 RTO로 공급하는 송풍기에 트

러블이 있을 경우에 대비하여 전원확보 및 예비 팬이 필요하다.

5. 결론

VOC 처리는 당면한 환경문제로 관심사항이 되고 있으나, VOC 제거를 위한 RTO 설비의 안전문제는 간과되고 있는 실정이다. RTO 설비는 가연물과 점화원이 동시에 존재하고 있어 화재 및 폭발 위험은 물론 독성물질에 의한 환경 및 인명피해 위험이 잠재되어 있으므로 안전 담당자들이 안전시스템을 설치하고 유지관리하며, 안전운영절차의 이행 및 지속적인 관리가 중요하다.

RTO 설비의 주요사고 원인으로는 비정상 상태에서 고농도의 VOC 유입, 운전절차의 미숙, 시스템의 결함 등이 있으므로 이에 대한 사고 시나리오를 설정하고, 시나리오 결과에 따라 안전성과 경제성을 고려한 대책을 수립하면 위험관리에 효율적으로 사용할 수 있을 것이다. ☞

— 정리: 연구컨설팅부 차장 김인태