

순차식 촉매연소 시스템

유상필, 정남조, 이승재, 류인수, 강성규, 송광섭
한국에너지기술연구원

Sequential Catalytic Combustion System

S.P. Yu, N.J. Jeung, S.J. Lee, I.S. Ryu, S.K. Kang and K.S. Song
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

Compared to conventional flame combustion, catalytic combustion had the advantage of oxidation of V.O.C. gas which was high voluminous, low caloric mixture flow. However, the temperature of mixture gas should be over the one of catalytic reaction start and the control of reaction on the catalytic surface tends to be vulnerable. To overcome these obstacles, composition of both catalytic combustor and heat exchanger was devised and named the sequential catalytic combustion system. In this system, only trigger unit needed preheating process for transient starting time. Once trigger unit was ignited, the next unit was supplied heat to ignite from that and same process was performed to the last one sequentially. When it come to steady state, whole mixture gas was oxidated at each unit simultaneously and preheating for trigger unit was not needed any more. System of 100 kcalh/hr capacity was devised and operated successfully.

1. 서론

촉매연소란, 공기와 연료가스의 혼합가스가 발화온도 이하의 조건에서 촉매표면에 연소반응이 존재하는 현상을 말한다. 촉매연소는 일반 화염연소와 비교할 때 표면연소, 회박연소라는 두 가지 특성을 갖는다. 이는 첫째, 대상 혼합가스에 대해 충분한 표면적이 확보되면 완전연소가 가능하고, 둘째, 화염이 존재할 수 없는 회박조건(LPG 기준, 당량비 0.2 근처)에서도 연소반응이 유지되어 낮은 단열화염온도(일반 화염온도 1400 °C 전후, 촉매연소 500 °C 전후)를 갖는 저온연소가 가능함을 의미한다.⁽¹⁾ 촉매연소는 광범위하게 쓰이는 화염연소보다 특수한 상황에 있어서 보다 유리하다. 특히, 대유량,저발열 VOC 가스의 소각의 경우, 별도의 도움없이 직접연소가 가능한 장점이 있다.

최근에 환경에 대한 관심이 높아지면서 날로 강화되고 있는 VOC 배출규제에 의해 VOC 소각설비에 대한 관심이 높아져가고 있다. 특히, 산업용 VOC 배출처리장치의 국내시장 규모는 2003년 기준으로 연 1000억원대를 상회하며, 성장속도가 연 10% 이상으로 매우 빠르다.⁽²⁾ 기존의 화염연소를 주축으로한 열분해 소각장치는 적용범위가 넓으나, 고온으로 인한 연소생성물의 2차오염과 고에너지 소모성 장치라는 단점을 가지고 있다. 광분해,습식,바이오 등의 방법들 역시 특수한 조건에 국한되어서 제한이 많다. 반면, 촉매연소는 그 고유한 특성으로 인해 산업용 설비에서 주로 발생하는 100°C 전후의 대유량, 저발열 VOC 가스의 처리에 매우 적합하다. 이런 이유로 기존의 설비에 보조적인 수단으로 촉매연소를 적용하는 시

도가 활발히 추진되고 있다.

그러나 촉매연소를 주로 하는 VOC 처리장치는 극복해야 할 몇 가지 문제점을 갖고 있었다. 첫째, 촉매의 성능 문제이다. 산 가격에 뛰어난 소각능력을 갖는 촉매의 개발은 매우 시급하다. 그러나 다행히도 최근의 활발한 소재개발을 통해 일정 수준의 경제성과 적용성을 확보한 것으로 평가되며, 따라서 본 논문에서 논의로 한다.⁽³⁾ 둘째, 혼합가스 예열문제이다. 촉매연소는 연료가스의 종류에 따라 각각의 촉매연소 개시온도를 갖는다. 따라서 혼합가스의 온도가 개시온도 이하일 경우, 예열과정이 필요하며, 대유량의 혼합가스의 예열에 따른

화염연소로 인해 추가연료의 공급, 장치 내구성 저하, 폭발 위험, 고온 생성물 발생 등의 문제들이 발생한다. 대용량일수록 예열용 화염연소의 사용이 비례하므로, 이러한 문제들은 촉매연소 적용의 장점을 상쇄한다. 셋째, 촉매연소 제어 문제이다. 촉매연소는 혼합가스의 촉매 표면적 접촉 극대화가 필요하며, 이는 곧 혼합가스의 물리적 화학적 변화에 촉매연소가 매우 민감하게 반응하는 것 (High Vulnerability)을 의미한다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 따라서 실제 운전

연료가스	화염연소 적화온도(°C)	촉매연소 개시온도(°C)	촉매 완전 연소온도(°C)
H ₂	510	20	20
CH ₄	615	370~380	>450
CH ₃ OH	450~500	20	150
CH ₂ H ₅ OH	450	80~100	250~300
MEK	505~516	100~175	300~350
Phenol	700	140~180	320~325
Benzene	700	130~180	250~300
Toluene	540~620	130~160	240
LPG		190~210	>200

Table. 1 연료가스에 따른 촉매연소 개시 온도

전에 있어서 현장에서 쉽게 발생할 수 있는 혼합가스의 온도, 유속분포, 당량비 등의 조건에 따라 매우 짧은 응답속도를 갖는다. 이런 경향은 화염이 공존하는 고온영역보다는 저온영역에서 특히 민감하며, 대유량일수록, 운전 범위가 클수록 강해진다.

본 논문에서는 위의 열거한 문제점들을 고려하여, 촉매연소의 장점을 극대화한 VOC 소각 시스템을 구현하는 것을 목적으로 한 순차식 촉매연소 시스템에 대해 설명하려 한다.

2. 순차식 촉매연소 시스템

2-1. 개념

대용량 촉매연소 시스템은 병렬연소 방식이 유리하다. 대유량 혼합가스를 단일 촉매 연소기에서 일괄 처리하는 방식은 확장된 촉매 표면에서의 혼합기체 유속과 농도분포의 균일성 유지가 힘들고, 예열과정에서 고에너지가 필요하다. 반면, 대유량을 여럿으로 나누어 각각의 연소기 유닛에서 분산연소하는 병렬연소 방식은 유동제어에 유리하며 따라서 제어가 용이하다.

시스템 시동 관점에서는 직렬연소방식이 유리하다. 직렬연소방식이란, 초기 시스템 시동시 트리거 유닛에서 발생한 촉매연소 발열량이 다음 유닛의 예열과정에 쓰여지는 과정이 순차적으로 이어져 마치 도미노 현상과 같은 연쇄적인 예열과 촉매연소의 연결이 이루어지는 방식을 뜻한다.

즉, 초기 과도상태(Transient State)에서는 직렬연소방식을 통해 예열문제를 해결하고, 정상상태(Steady State)에 이르면 병렬연소방식을 통해 제어문제를 해결한다.

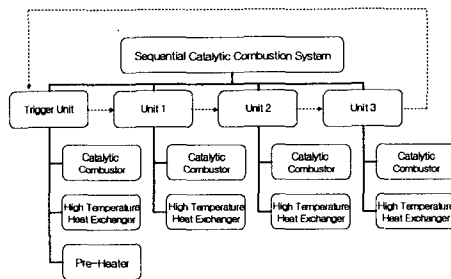


Fig. 1 순차식 촉매연소 시스템의 개념

2-2. 구성

시스템을 구성하는 각각의 유닛들은 촉매연소부와 열교환기로 구성된다. 촉매연소부에서 발생한 열량은 열교환기를 통해 다음 유닛의 촉매연소부로 전달된다. 따라서 시스템 구동은 이론적으로 2개의 유닛으로 가능하지만, 실제로는 현실적인 유닛 용량의 분배와 직선유로를 확보하기 위해 4개의 유닛조합을 기본으로 한다.

Fig.2 는 유닛을 나타낸 그림이다. 촉매 연소부는 촉매가 담지된 지지체, 유동제어 셀(Cell), 그리고 단열층으로 이루어진다. 촉매 지지체는 용량에 따라 계산된 부피의 세라믹 하니컴을 사용한다. 세라믹 하니컴은 보통 200 cell/inch² 를 사용하고 처리가스의 종류에 적합한 촉매를 일정량 담지 시킨다. 유동제어 셀은 촉매 지지체보다 상부에 위치하며 100~150cell/inch² 의 세라믹 하니컴이 사용되었다. 유동제어 셀을 통해 유속과 농도 불균일로 인한 Hot Spot 발생을 억제하며, 축열로 인한 열적버퍼 효과를 얻는다. 단열층은 촉매 표면부터 열손실을 방지해서 열평형을 유지한다.

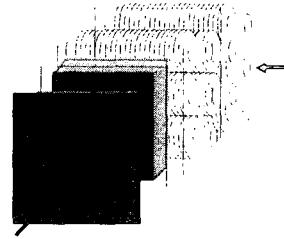


Fig. 2 유닛의 구성

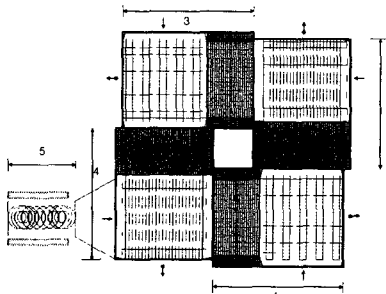


Fig. 3 순차식 촉매연소 시스템 단면도에만 설치한다. 기존장치보다 1/4에 불과한 열량 (1)트리거 유닛 (2) 유닛1 (3) 유닛2 (4)을 투입해서 구동이 가능하므로 예열부담과 파생 문제점이 감소한다.

열 교환부는 촉매연소 발열량의 일부를 혼합가스로 전달하여 다음 유닛을 위한 예열과정을 수행한다. 고온용 핀 튜브 삼각 뱅크로 이루어져 있으며, 핀 튜브의 셸 면으로는 고온 연소가스가, 튜브면으로는 혼합가스가 통과한다. 핀 튜브의 개수와 배열에 관한 설계인자는 혼합가스 유속, 온도, 당량비, 성분에 따른 단열화염온도, 촉매연소 개시온도, 연소가스의 배출온도, 연소가스의 유속, 열손실 등의 변수에 의해 결정된다.

시스템의 초기구동을 맡는 예열기는 트리거 유닛

3. 실험 및 결과

순차식 촉매연소 시스템을 실제로 제작, 구동시켰다. 촉매표면과 장치 각 부분의 온도분포를 얻기 위해 열전대를 배치했으며, 연소가스 분석을 위해 THC(Total Hydro-Carbon) 분석기를 사용하였다. 혼합가스는 LPG와 공기를 당량비 0.2 ~0.4 영역의 농도로 섞어서 사용하였다. Fig. 4 는 실험장치의 모습이다. 트리거 유닛으로부터 순차적으로 연소반응이 전달되어 가는 것을 확인하였다. 계산결과, 열교환부를 통해 회수되어, 전달되는 열량은 전체 발열량의 약 52%이고, 나머지는 연소가스를 통해 배출된다. Fig5 는 시간에 따

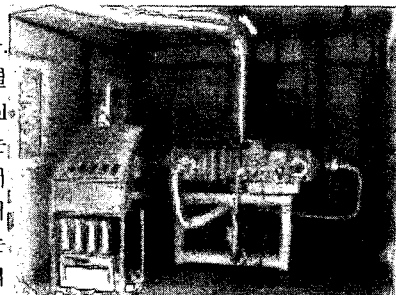


Fig. 4 실제 제작 장치의 모습

른 촉매층의 온도변화를 나타낸 그래프이다.

트리거 유닛으로부터 순차적으로 각 유닛의 촉매층의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. LPG 가스의 촉매 연소 개시온도인 210°C를 지나면서 촉매층의 온도가 급격히 상승하는 것이 관찰된다. 이 때, 연소가스의 THC 농도는 급격히 감소하며 (100ppm 이하) 전환율(연소효율)이 99% 이상 상승한다. 따라서 이 영역이 촉매연소가 활발히 진행되는 부분으로 볼 수 있다. 총 4개 유닛의 촉매연소가 정상상태로 들어

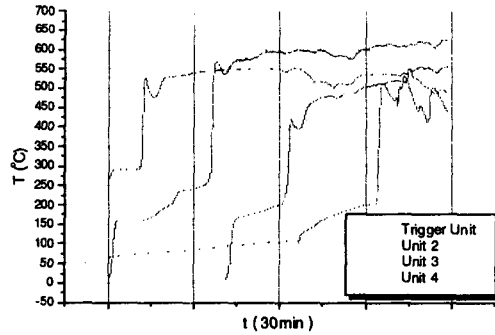


Fig. 5 시간에 따른 각 유닛의 촉매층 온도변화

어선 후, 트리거 유닛의 예열기를 정지시켰다. 별도의 추가 열원공급을 통한 예열과정의 생략을 통해서도 순차식 촉매연소 시스템이 열평형 상태를 안정적으로 유지함을 확인했다.

개별 유닛 혼합가스 처리량	60 m ³ /hr
전체 시스템 혼합가스 처리량	240 m ³ /hr
개별유닛 LPG 가스 처리량	1.2 m ³ /hr
전체 시스템 LPG 가스 처리량	4.8 m ³ /hr
처리열량	105,600 kcal/hr
개별 유닛당 시동시간	30분
온도범위	250 - 600 °C

Table. 2 순차식 촉매연소 시스템 제원표

4. 결론

촉매연소에서 발생한 열량을 열교환기를 통해 다음 촉매연소의 예열과정으로 전달하는 순차적인 시스템 구성을 통해 대유량 저발열 가스에 대한 분산처리를 시도하였다. 이를 통해 촉매연소가 한층 안정되고, 예열 에너지 소모량의 75% 이상이 감소했다. 차후 실제 산업현장에서의 적용 및 기술확산이 기대된다.

5. 참고문헌

1. R.E. Hayes, S.T.Kolaczowski, Gordon and Breach Science publishers, Introduction to Catalytic combustion, (1997)
2. 환경부, 유기용제 사용분야에서의 휘발성유기화합물 저감계획 보고서 (2003)
3. Heck, R.M, Catal.Today, 53, 519 (1999)
4. Kang, S.K., Ryoo, M.Y., Yoo, I.S, Cho, S.J., Song, K.S. and Seo, Y.S., Stud.Suf.Sci.Catal., 121, 419 (1999)
5. Seo, Y.S. Cho, S.J., Kang, S.K. and Shin, H.D., Catal.Today, 59, 75 (2000)
6. 유상필, 서용석, 송광섭, 류인수, 24th KOSCO symposium, 79, 84, (2001)
7. S.P.Yu, Y.S.Seo, K.S.Song, S.J.Cho, 5th IWCC, 83, 85 (2002)
8. S.P.Yu, Y.S.Seo, K.S.Song, S.K.Kang, "Development of a Catalytic Combustor with Heat Exchanger", K.J. Chem.Eng., 20(3), (2003)