

## 축열 촉매연소장치에서 휘발성 유기화합물의 소각특성

송광섭<sup>†</sup> · 서용석 · 정남조 · 유상필 · 유인수 · 이상남 · 최재진\* · 정진도\*

한국에너지기술연구원 촉매연소연구센터

305-343 대전시 유성구 장동 71-2

\*호서대학교 환경공학과

336-795 충남 아산시 배방면 세출리 산 29-1

(2003년 2월 13일 접수, 2003년 3월 31일 채택)

## Incineration Characteristic of Volatile Organic Compound in the Regenerative Catalytic Oxidizer

Kwang Sup Song<sup>†</sup>, Yong Seog Seo, Nam Jo Jeong, Sang Phil Yu, In Soo Ryu,  
Sang Nan Lee, Jae Jin Choi\* and Jin Do Jung\*

Catalytic Combustion Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

\*Department of Environmental Engineering, Hoseo University, San 29-1 Sechul-ri, Baebang-myun, Asan, Chungnam 336-795, Korea

(Received 13 February 2003; accepted 31 March 2003)

### 요 약

높은 열 회수특성으로 인해 낮은 농도의 VOC를 소각처리 시키는데 매우 유용한 장치로 알려진 축열 촉매소각장치를 제작하고 특성실험을 수행하였다. 톨루엔의 농도가 150 ppm 이상인 모사 VOC 경우 보조 열을 공급하지 않아도 시스템을 안정적으로 운전할 수 있음을 확인하였고, 밸브가 전환될 때 미반응 톨루엔이 배출되지만 95% 정도의 높은 VOC 소각 처리 효율을 얻을 수 있었다. 축열 촉매소각장치의 운전에서 VOC의 처리효율은 유체의 흐름을 바꾸어주는 밸브의 전환주기, VOC 농도, 축열재의 양 등에 의해 결정되는데, 이들의 영향을 분석하였다.

**Abstract** – Regenerative catalytic oxidizer(RCO) having high recovering efficiency of energy enables catalytic purification of polluted air containing a low content of volatile organic compounds(VOCs). From experimental study of the regenerative catalytic oxidizer, the VOC toluene concentration higher than 150 ppm can be handled without introduction of additional energy. The removal efficiency of VOC from the polluted air is around 95%. The influence of several operating parameters including cycle period, concentration of the VOC and mass of inert material(cordierite honeycomb) on the removal efficiency has also been examined.

Key words: VOC, Catalytic Combustion, Regenerative Catalytic Oxidizer, Toluene, Air Purification

### 1. 서 론

휘발성유기화합물(VOC)은 인체에 암을 유발시키고, 광학적 스모그와 지구온난화를 가져오므로, 이에 대한 배출 규제가 점점 강화되고 있다. 산업 공정에서 배출되는 VOC는 성분과 농도가 다양하기 때문에 여러 가지 처리(제거)방법이 사용되고 있는데, 촉매연소 방식이 높은 처리효율과 저렴한 운전비 등으로 많이 사용되고 있다[1]. 화염연소 장치에서는 화염의 온도를 750 °C 이상으로 유지해야 안정된 연소를 얻을 수 있지만, 촉매연소 장치에서는 연소실(촉매 층)의 온도를 350 °C 정도로 유지하여도 완전연소가 가능하다[2-5]. 하지만 VOC를 촉매연소 반응시켜 처리하기 위해서는 연소 반응온도까지 가열시키는 것이 중요하다. 이와

같이 반응온도까지 VOC를 가열시키는데 필요한 열을 최소화하기 위해 축열 연소시스템이 도입된다.

축열 연소장치는 반응열 발생이 적은 발열반응에서 열효율을 향상시키기 위해 Motros 등[6, 7]이 제안하였고, 다양한 반응에 대해 연구하였다[8-10]. 장치의 구성은 연소실과 두 개 이상의 축열실로 구성되어 있는데, 축열실에서 유체의 흐름이 주기적으로 바뀌면서 연소배기가스에서 축열재로 열이 저장되는 과정과 축열재에 저장된 열이 유입되는 가스를 가열하는 과정이 반복된다. 이와 같이 축열 연소장치의 특징은 반응에 의해 발생된 열이 축열 매체를 통해 유입되는 가스에 직접 전달되도록 함으로서, 반응물이 일정온도 이상 되어야만 반응이 진행되는 촉매반응에서 열효율을 높일 수 있도록 한 것이다. 축열 연소장치는 처음에 황산을 제조하는데 있어 이산화황을 산화시켜 삼산화황을 만드는데 적용하였으나[11], Eigenberger와 Nienke[12]이 축열 연소장치를 촉매연소반응에 도입하여 농도가 낮은 메탄 또는 프로판 혼합가스의 촉매연

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kssong@kier.re.kr

소 특성 및 온도분포 등에 대해 고찰하였다. Beld 등[13]은 에틸렌과 프로판이 혼합된 가스가 촉매연소 될 때, 축열 연소장치의 제어와 목표 효율을 얻기 위한 온도 설정 등에 대해 고찰하였다.

이와 같이 축열 연소장치를 이용한 촉매연소 특성 연구는 주로 프로판으로 만든 모사 VOC를 이용하여 실험한 결과이거나, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 이를 예측한 연구가 대부분이다. 하지만 실제 공정에서 사용되는 용제는 주성분이 톨루엔으로 되어 있고, 이에 따라 배출되는 VOC도 톨루엔이 주성분으로 되어 있다. 실제 촉매연소 반응은 반응물과 사용되는 촉매에 따라 연소반응 특성이 달라지기 때문에 장치를 설계하는데 있어서 연소촉매와 연계하여 공정에서 배출되는 톨루엔으로 만든 모사 VOC를 이용한 실험결과가 더 유용하다. 특히, 공정에서 발생하는 VOC를 완전히 소각 처리할 수 있도록 축열 연소장치의 제어 모드 설정 및 촉매 층의 온도 변화에 따른 축열 연소장치의 운전 특성 등을 파악하는데 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구에서는 산업 생산 현장에서 배출되고 있는 VOC를 효과적으로 처리할 수 있는 장치를 개발하기 위해, 백금이 담지된 하니컴 촉매 상에서 톨루엔의 연소반응 특성을 분석하고, 하니컴 축열재와 백금 담지 하니컴 촉매를 이용하여 축열 촉매소각장치를 제작하고, 톨루엔으로 만든 모사 VOC를 이용하여 축열 촉매연소반응 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

본 연구에서 사용한 축열 촉매소각장치는 연소촉매, 축열재, 보조열 공급 장치로 구성된 연소실, 모사 VOC 제조 및 공급 장치, 시스템 제어 및 분석 장치로 구성되어 있다. 연소실은 직렬형으로 중앙에 보조 열 공급 장치가 설치되어 있고, 양끝에 밸브를 설치하여 흐름을 바꿀 수 있도록 하였다(Fig. 1 참조). 연소촉매는 코디어라이트 하니컴에 백금을 담지(2.3 g-Pt/l)하여 사용하였고, 축열재는 코디어라이트 하니컴(200 cpi)을 그대로 사용하였다. 연소촉매 및 축열재로 사용한 하니컴은 크기가 150×150×100 mm이다. 이것을 쌓아서 규정한 두께의 하니컴 축열재를 구성하였다. 보조 열 공급 장치는 표면연소 버너로 도시가스를 연소시켜 자동으로 공급할 수 있도록 구성되어 있다. 보조 열은 축열 촉매 소각장치를 초기에 예열할 때 사용되었고, VOC의 농도가 낮아 시스템

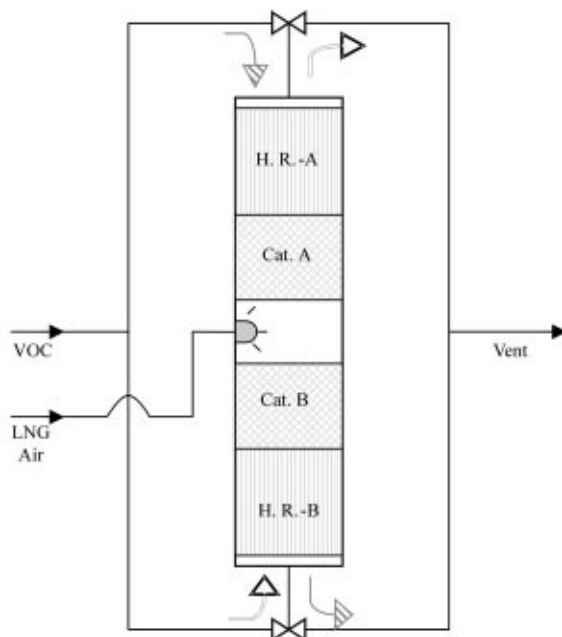


Fig. 1. Schematic diagram of regenerative catalytic oxidizer.

이 안정화되지 않을 때 추가 열을 공급하여 시스템이 안정화 되도록 하였다. 모사 VOC는 톨루엔과 공기를 이용하여 만들었다. 간접가열 방식으로 일정한 온도(40℃)로 유지된 밀폐용기에 톨루엔을 1/3 정도 넣고, 하부에서 공기 기포가 발생되도록 하여 톨루엔이 포화된 가스를 만든다. 이 가스를 일정 유량의 공기와 혼합하여 규정한 농도의 모사 VOC를 만들었다. 축열 촉매소각장치에서 유체 흐름의 전환은 시스템의 안정적인 운전을 위해 매우 중요하므로, 출구 측의 온도가 정해진 온도에 도달하면 유체의 흐름이 자동적으로 바뀌도록 하였다. 축열재의 온도를 측정하기 위해 열전대를 14개 설치하였고, 하이브리드 기록계(YOKOGAWA, DR230)와 컴퓨터를 이용하여 5초 간격으로 측정 기록하였다.

### 2-2. 실험방법

실험은 예열실험과 휘발성유기화합물의 축열 촉매소각 실험으로 구분하여 수행하였다. 축열재의 예열에 따른 VOC 소각 특성변화를 고찰하기 위한 예열실험은 같은 유량의 공기를 흘려보내면서 촉매사이에서 설치된 연소기를 이용하여 열(도시가스 연소열)을 공급하여 축열재의 온도를 상승시킨 반면, 휘발성유기화합물의 축열 촉매소각 실험은 예열실험과 동일하게 도시가스를 공급하면서 동시에 모사 VOC를 공급하였다. 모사 VOC가 도시가스와 같이 공급되면 VOC가 갖고 있는 연소열에 의해 시스템이 쉽게 안정화 되었으며, VOC의 농도가 높은 경우 자체 연소열로 운전이 가능하였다. 연소열 공급은 촉매 층의 온도를 상한온도(350℃)와 하한온도(200℃)를 설정하고, 이 온도범위 내에서 연소열이 공급되도록 하였다. 촉매를 보호하기 위해 촉매의 상한온도를 설정하였고, VOC가 안정적으로 연소되도록 하한온도를 설정하였다.

축열재와 촉매 층을 통과하는 유체 흐름을 정 방향으로 역 방향으로 구분하고 시스템의 운전과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 정 방향흐름에서 연소열이 공급되고 이 열이 축열재(A)를 가열한다. 시간이 지남에 따라 축열재의 온도와 축열재 끝단을 지나는 유체의 온도가 상승한다. 일정시간이 지나 축열재를 통과한 유체의 온도가 규정한 온도(대부분의 경우 45℃)로 되면 유체의 흐름이 역 방향으로 바뀐다. 유체의 흐름이 역 방향으로 바뀌면, 그 동안 축열재(A)에 저장되었던 열이 유입되는 가스를 가열시키며, 이 열과 연소열이 반대 측 축열재(B)를 가열한다. 유체가 계속 흐름에 따라 축열재(A)의 온도는 서서히 낮아지고, 유체로부터 축열재(B)로 공급되는 열량이 증가하며, 축열재(B)를 통과한 유체의 온도가 상승한다. 유체의 온도가 규정한 온도(45℃)가 되면 유체의 흐름은 다시 정 방향으로 바뀌고, 유체로부터 열을 공급받았던 축열재(B)가 반대로 유체에 열을 공급하고 반대 측 축열재(A)는 유체로부터 열을 공급받아 온도가 상승한다. 이와 같이 유체의 흐름이 주기적으로 반복되면서 안정화되는데, 축열재의 온도 및 입구와 출구에서 VOC의 농도를 측정하여 축열 촉매소각장치의 소각특성을 분석하였다. 휘발성유기화합물은 THC(total hydrocarbon)분석기(horiba)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 톨루엔의 촉매연소 특성

축열 촉매연소 장치에서 사용한 백금 담지 하니컴 촉매 상에서 톨루엔의 연소반응 특성을 살펴보기 위해, 먼저 고정층 반응기에서 반응온도 및 톨루엔의 농도 변화에 따른 반응속도를 측정하였다. 크기가 20×20×20 mm인 백금 담지 하니컴 촉매에 공간속도를 30,000/h로 일정하게 유지하고 온도에 따른 반응속도의 변화를 전환율로 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 톨루엔의 촉매연소 반응은 모사가스의 온도가 120℃ 되면 개시됨을 알 수 있었고, 완전연소 반응온도는 농도에 따라 달라지지만 대부분 250℃ 정도 되면 완전연소 됨을 알 수 있었다. 또한 150℃ 이하의 일정한 온도에서 톨루엔의 농도가 증가하면 전환율이 감소하였

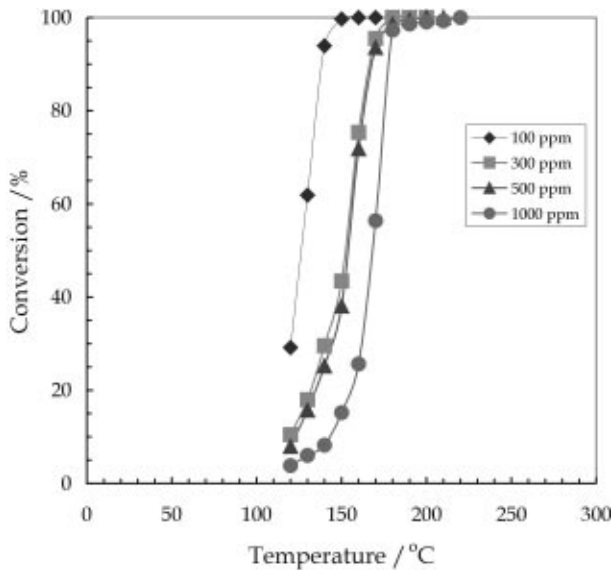


Fig. 2. Conversion curve of toluene over Pt/honeycomb. SV: 30,000/hr.

다. 일반적으로 탄화수소의 촉매연소 반응은 반응물과 촉매의 종류에 따라 반응속도가 달라진다고 알려져 있다[14]. 백금 담지 하니컴 촉매 상에서 톨루엔의 반응속도는 반응기에 들어오는 톨루엔의 양과 촉매 표면에서 반응되고 밖으로 배출되는 톨루엔의 양으로부터 계산할 수 있다. 일정한 공간속도와 규정된 온도에서 톨루엔의 전환율(Fig. 2 참조)이 낮아지는 것으로부터 주어진 촉매표면에서 연소(반응)되는 톨루엔의 절대 양 증가가 매우 적음을 알 수 있다. 즉 백금촉매 상에서 톨루엔 반응속도는 톨루엔 농도에 거의 의존하지 않고, 톨루엔이 촉매 표면에 머무른 시간과 반응온도에 의존함을 알 수 있다. 이와 같이 백금 담지 하니컴 촉매 상에서 톨루엔의 반응속도가 농도에 대한 의존성이 낮기 때문에, 규정된 양의 톨루엔을 처리하기 위해 필요한 촉매의 양 또는 일정량 설치된 촉매로 처리할 수 있는 톨루엔의 양(농도×유량)은 실험값으로부터 쉽게 계산하여 얻을 수 있다. 즉, 실험실 규모의 장치에서 얻은 값을 제작하고자 하는 장치의 크기와 연계하여 톨루엔 처리량 증가에 따라 선형적으로 촉매량을 증가시켜도 됨을 알 수 있다.

### 3.2. 축열 촉매소각장치에서 VOC의 소각특성

산업공정에서 배출되는 VOC는 대부분 낮은 농도로 배출되고 있지만, VOC는 악취와 암의 유발과 같이 인체에 해를 주기 때문에 반드시 제거해야 한다. VOC를 제거하는 기술로 연소(소각)방식이 상업적으로 사용되었으나, 농도가 낮은 경우 보조 열량이 많이 필요하기 때문에 최근에는 촉매연소 방식 또는 축열 촉매연소 방식이 도입되고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 축열 촉매연소 방식은 연소열을 최대한 활용하기 때문에 농도가 낮은 VOC의 처리에 효과적이다. 본 연구에서는 낮은 농도의 모사 VOC(톨루엔 농도: 50, 100, 150, 200, 250, 300 ppm)를 만들어 축열 촉매소각장치의 VOC 소각 특성을 분석하였다. Fig. 3은 모사 VOC의 유량을 23 m<sup>3</sup>/h로 일정하게 유지하면서, 다양한 농도에서 축열 촉매소각 장치의 운전 시작 시점으로부터 시간의 변화에 따라 배출되는 VOC의 농도를 처리효율로 계산하여 나타낸 것이다. 이때 촉매 층의 부피는 각각 4.5 l이고, 촉매 층 양단에 설치된 코디에라이트 하니컴 축열재의 부피는 각각 6.75 l이다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 VOC의 농도가 높을수록 쉽게 안정화가 이루어졌고, 톨루엔의 농도가 150 ppm 이상인 모사 VOC의 경우에는 보조 열원의 공급 없이 안정적으로 연속운전이 가능하였지만, 톨루엔의 농도가 100 ppm 이하의 경우에는 3시간 이상 운전한 뒤에도 계속 보조열원을 공급해야만 연속운전이 가능하였다.

한편, 축열 소각장치는 유체의 흐름이 바뀔 때 반응영역에 도달하지

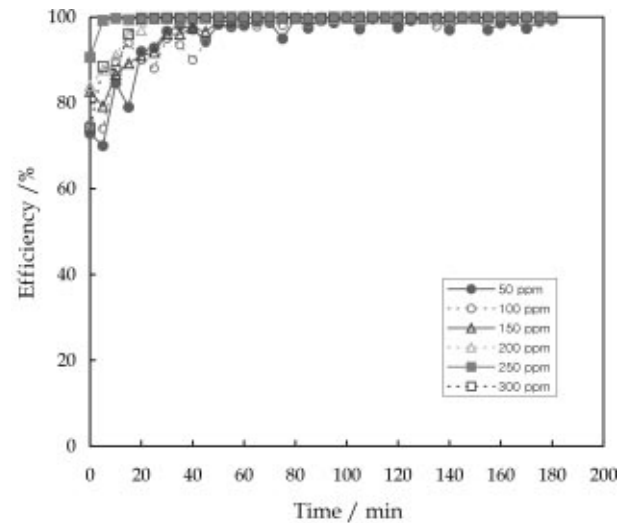


Fig. 3. Combustion efficiency of toluene in the regenerative catalytic oxidizer.

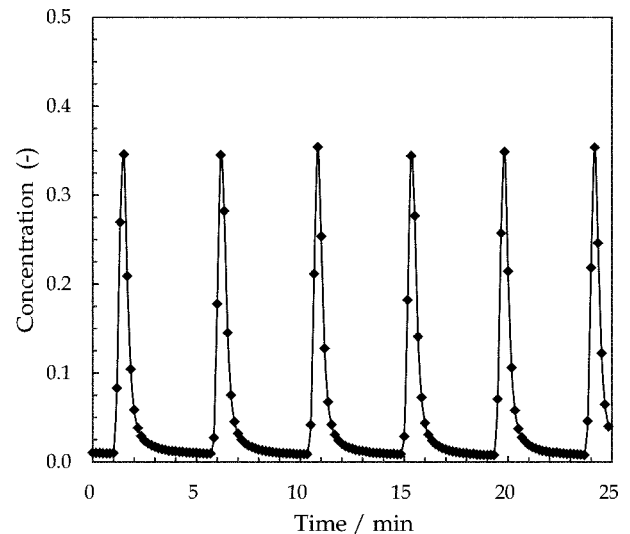


Fig. 4. Dimensionless concentration of toluene sampling at the outlet end of the RCO.

못한 VOC가 처리되지 못하고 밖으로 배출되는 근본적인 문제를 갖고 있다. 즉, 유체의 흐름을 바꾸어주는 밸브와 촉매 층 사이 공간에 체류하고 있던 VOC는 유체의 흐름이 바뀔 때 촉매연소 반응이 일어나지 못하고 대기 중으로 그대로 배출된다. Fig. 4는 축열 촉매소각장치가 안정화 된 후 장치에서 배출되는 VOC를 측정하여 나타낸 것이다. Fig. 4에서 배출농도는 유입되는 VOC의 농도로 나누어 무차원화 한 것이다. 축열 연소장치에서 배출되는 VOC의 농도 분포는 축열체의 형상과 공극률에 따라 미반응 공간이 변화하므로 당연히 변화되지만, 일정한 축열체에서 VOC의 농도 및 유속의 변화에 따른 배출 VOC의 농도가 일정할 것으로 예상하였지만, 농도의 변화에 따른 무차원화 비교에서 오차 범위가 넓게 나타나고 있다. 이것은 배출 VOC의 농도 증가에 따라 축열 층의 온도가 바뀌고, 이로 인해 VOC의 연소반응영역이 변화되는 것에 기인한 것으로 추측된다. 축열 촉매소각장치에서 유체의 흐름이 바뀔 때 연소되지 못한 VOC가 그대로 배출되지만, 축열 촉매소각장치가 안정화되면 VOC가 대부분 소각 처리되기 때문에 낮은 농도를 제외하고 대부분의 경우 평균 95% 정도의 높은 VOC 소각 처리 효율을 얻을 수 있었다. 상업적으로 공급되고 있는 축열 촉매소각장치에서는 처리효율을 높이기 위해 미반응 가스를 재처리할 수 있는 재순환 영역의 설치

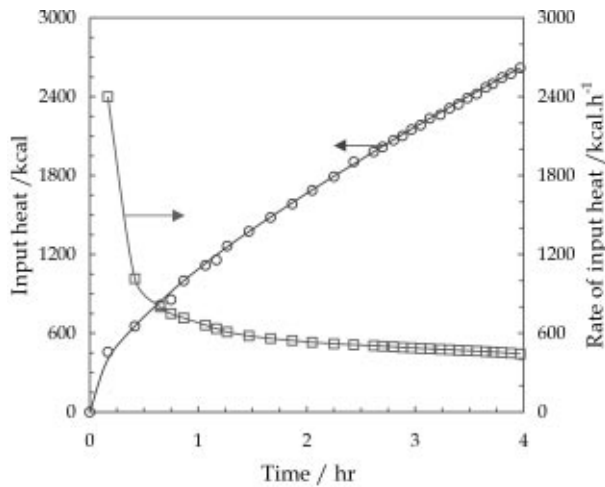


Fig. 5. Energy consumption for the regenerative catalytic oxidizer.

또는 3탑식 축열 촉매소각장치를 만들어 처리효율을 높이고 있다.

### 3.3. 축열재의 열 축적 및 방출 특성

축열 촉매소각장치는 주기적으로 유체의 흐름이 바뀌면서 연소열을 저장하고 회수한다. 연소열의 회수율은 축열재의 부피와 유체의 흐름이 바뀌는 주기에 의해 영향을 받으며, 장치의 열손실이 열 회수에 미치는 영향도 크다. 본 연구에서 제작한 축열 촉매소각장치의 열 회수 특성을 고찰하기 위해 모사 VOC를 사용하지 않고 보조 열원(프로판 연소)으로 장치를 운전하였을 때 초기 장치의 시동에서 시스템이 안정화될 때까지 에너지 소비량을 Fig. 5에 나타내었다. 비록 제한된 연소열로 인해 프로판이 완전연소 되지 않지만, 프로판의 화염연소를 완전연소로 가정하고 나타낸 것이다. 운전초기에 장치의 가열에 많은 열이 필요하고, 시스템이 안정화되면 장치로 손실되는 열량과 연소배기가스에 의해 배출되는 열이 일정해짐을 알 수 있다. 장치를 통해 손실되는 열은 반응영역(촉매 층)의 온도에 의해 결정되기 때문에 평가하기 어렵지만, 배기가스에 의해 손실되는 열량은 배기가스의 유량과 온도를 측정하여 계산할 수 있다. 모사 VOC의 농도를 200 ppm으로 일정하게 유지하면서 유체의 흐름이 바뀌는(밸브의 전환) 온도를 35 °C에서 75 °C로 변화시키면서 배출되는 가스의 온도를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보인바와 같이 밸브의 전환온도가 증가할수록 유체의 흐름이 바뀌는 주기가 길어지며, 배기가스의 최대 온도 또한 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한 유체의 흐름을 바꾸어 주는 밸브의 작동시간과 응답속도의 지연 등으로 인해 실제 규정된 온도보다 높은 온도의 배기가스가 배출됨을 알 수 있었다. 축열 촉매소각장치에서 밸브의 전환온도 변화에 따라 유출가스가 갖고 나가는 현열을 공기의 비열로부터 계산하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보인 바와 같이 밸브의 전환온도가 증가하면 비록 유체흐름이 바뀌는 주기가 길어지더라도 유체의 온도 증가에 따라 유출가스가 갖고 나가는 열량 증가가 커서 전체적으로 현열 손실이 증가함을 알 수 있었다. 한편, 밸브의 전환온도가 감소하면 주기가

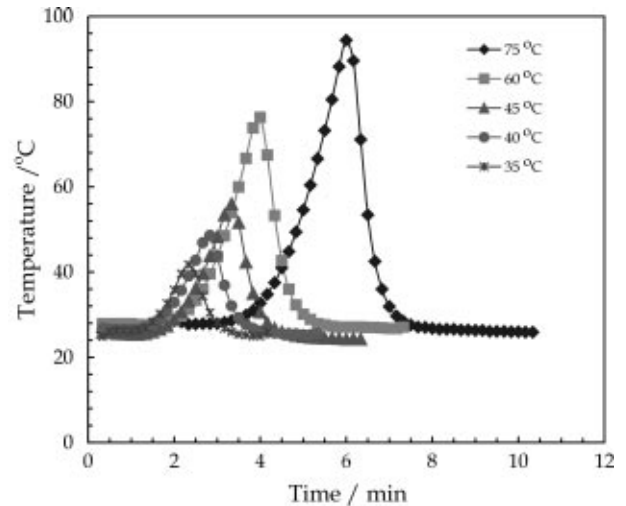


Fig. 6. Temperature change of effluent gas stream for 1 cycle.

짧아져 유출가스가 갖고 나가는 열량이 감소하지만, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 유체의 흐름이 바뀔 때 처리되지 못한 물질이 증가하기 때문에 축열 촉매소각장치의 운전에서 유체의 흐름을 바꾸는 기준 온도의 설정은 매우 중요하다. Haynes 등[15]은 단일시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 축열 촉매소각장치의 유체흐름을 바꾸는 주기에 대한 기준을 제시하였는데, 실제 장치에 적용하기 위해서는 열손실을 고려해 주어야한다.

축열재의 열 축적 및 방출 특성은 유체의 흐름이 바뀔 때 축열재의 온도변화로부터 계산할 수 있다. 모사 톨루엔의 농도 150 ppm, 밸브의 전환온도를 45 °C로 일정하게 유지하면서 축열재의 온도변화를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 축열재의 양 변화에 따른 특성을 고찰하기 위해 각각 코디어라이트 하니컴(150×150×100) 3개(Fig. 7(a))를 설치하였을 경우와 하니컴 4개(Fig. 7(b))를 설치하였을 경우에 대해 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 보인바와 같이 시스템이 안정화되면 축열재의 온도가 일정한 패턴(톱니바퀴 형태)을 보이고 있다. 온도가 가장 낮은 곡선은 축열재 끝단의 온도를 나타낸 것으로서, 유입되는 VOC의 온도 또는 배출가스의 온도를 나타내는 것이며, 온도가 가장 높은 곡선(1)은 촉매 층과 축열재의 사이 온도를 나타내는 것으로 연소실 전단의 촉매 층에서 반응이 완결된 후에는 축열체로 역할을 하고, 유체의 흐름이 바뀌면 촉매연소 반응 층으로 되어 열을 배출하기 때문에 다른 축열체와 온도 변화 패턴을 보임을 알 수 있었다. 각 축열체 양단에서 측정한 온도 변화를 기준으로 축열체와 유체(연소가스) 사이의 열 이동을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 또한 Table 2에는 축열과 방열에 따른 축열체의 최대 및 최소 온도와 유체 흐름이 바뀌는 주기를 같이 나타내었다. Table에서 보인바와 같이 축열재의 양이 많을수록 주기가 길어지며, 축열과 방열에 따른 축열체의 온도변화가 커짐을 알 수 있었다. 이로 인해 같은 양의 축열체 일지라도 축열량이 증가하며, 축열량 증가에 따라 시스템이 쉽게 안정화됨을 알 수 있었다. 한편, 코디어라이트 하니컴이 3개 설치된 경우(a)에 대기와 직접 접촉하여 열교환 하는 하니컴 축열체(A1)

Table 1. Sensible heat loss of effluent gas as a function of valve switching temperature

Valve switching temperature (°C)	Inlet temperature (°C)	Effluent gas temperature (°C)		Cycle time (min)	Sensible heat loss (kcal/h)
		Maximum	Minimum		
35	20	41.7	24.9	4.17	67
40	21	48.9	25.3	5.33	69
45	20	56.0	24.3	6.33	78
60	22.5	76.3	26.8	7.17	96
75	20	94.4	25.8	10.17	119

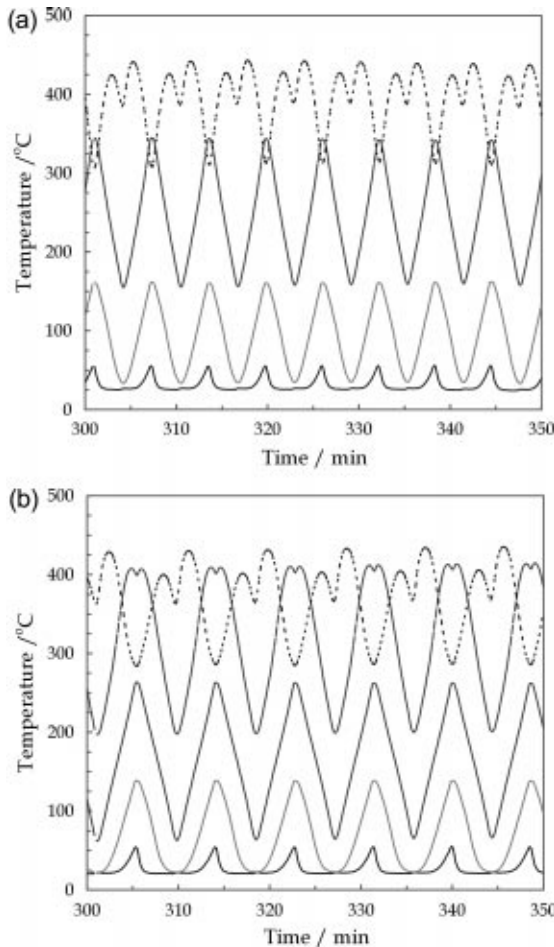


Fig. 7. Solid temperature profiles at the beds of the regenerative catalytic oxidizer.

는 다른 하니컴 보다 온도변화 폭이 적어 축적하는 열량이 적었으며, 열이 발생하는 연소실에 인접할수록 축열되는 열량이 증가하여 촉매 층에 인접한 하니컴 축열체(A3)에서 가장 많이 축열됨을 알 수 있다. 코디어라이트 하니컴이 4개 설치된 경우(b)에서도 연소실에 인접할수록 축열되는 열량이 증가하지만, 촉매 층에 인접한 하니컴 축열체(B4)에서 최대 값을 보이지 않고 중간 하니컴 축열체(B3)에서 가장 열이 축적(또는 방출)됨을 알 수 있었다. 또한 단위 시간동안 축열체가 열을 저장하는 양

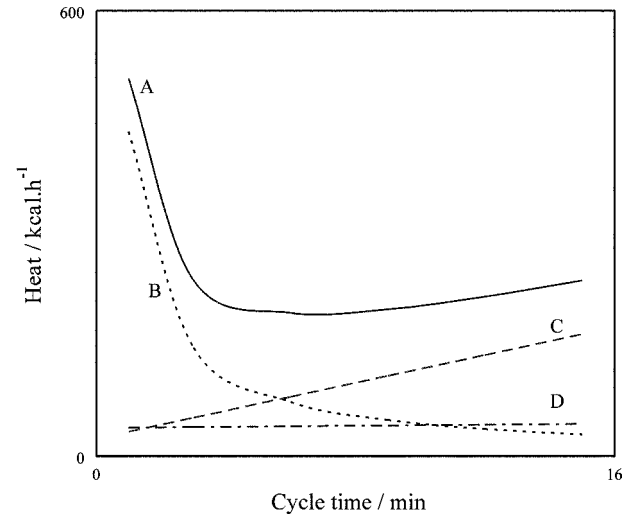


Fig. 8. Energy balance of the regenerative catalytic oxidizer. A; Total heat loss, B; Heat of combustion of unreacted toluene, C; Sensible heat loss of effluent gas, D; Heat loss from the surface of the RCO.

을 비교해 보면, 하니컴이 3개 설치된 경우에 더 높은 열저장 효율을 나타내며, 하니컴의 증가에 따른 부피의 증가에 비해 단위 시간동안 저장된 열을 증가량이 매우 낮음(부피증가 : 축열증가=1.3 : 1.1)을 알 수 있었다. 그러나 유체의 흐름을 바꾸는 밸브의 전환 주기를 일정하게 하면, 축열체에 저장되는 열은 축열체의 부피(하니컴의 수)에 비례하여 증가하고 이로 인해 촉매 층의 온도가 상승 한다[13]. 촉매 층의 온도가 규정된 값보다 상승하면 연소촉매가 소결되어 활성을 잃기 때문에 연소 촉매의 내열온도 이하에서 장치가 운전되도록 하는 것이 매우 중요하다. 축열 촉매소각장치가 안정적으로 운전되기 위해서는 VOC가 갖고 있는 열량이 장치에서 손실되는 열량보다 커야 된다. 장치에서 손실되는 열은 축열체의 부피와 유체 흐름이 바뀌는 밸브의 전환주기에 의해 결정된다. 축열체의 부피가 6.75 l 일 때, 본 실험을 통해 얻은 결과를 토대로 장치에서 손실되는 열량을 밸브의 전환주기 함수로 Fig. 8에 도식화하여 나타내었다. 여기서 장치에 의한 열손실은 밸브의 전환주기와 관계없이 일정한 것으로 가정하였다. 밸브의 전환주기가 증가할수록 배기가스에 의해 손실되는 열량은 선형적으로 증가한 반면, 밸브의 전환회수 감소에 의해 미반응 가스의 배출량이 감소하고 이로 인해 손실 열량이 반비례하여 감소하기 때문에 전체적으로 최저 열손실을 나타내는 밸브의 전환주기가 존재함을 알 수 있었다. 또한 밸브의 전환 주기 증

Table 2. Heat storage of the honeycomb at the regenerative catalytic oxidizer

		Minimum temp. (°C)	Maximum temp. (°C)	Cycle time (min)	Heat storage for 1 cycle (kJ)
Honeycomb, A1	Side 1	25.3±0.5	55.2±0.5	6.2	70.2
	Side 2	34.3±1.0	161.2±1.0		
Honeycomb, A2	Side 1	34.3±1.0	161.2±1.0	6.2	139.9
	Side 2	157.5±2.0	343.1±2.0		
Honeycomb, A3	Side 1	157.5±2.0	343.1±2.0	6.2	141.3
	Side 2	310.7±2.5	440.7±2.5		
Honeycomb, B1	Side 1	20.7±0.3	54.5±0.3	8.8	67.0
	Side 2	22.5±0.5	138.3±0.3		
Honeycomb, B2	Side 1	22.5±0.5	138.3±0.3	8.8	140.5
	Side 2	64.7±3.0	262.6±0.5		
Honeycomb, B3	Side 1	64.7±3.0	262.6±0.5	8.8	183.0
	Side 2	199.2±2.0	409.9±3.0		
Honeycomb, B4	Side 1	199.2±2.0	409.9±3.0	8.8	160.0
	Side 2	285.6±2.0	432.±3.0		

가는 미반응 가스의 배출 회수를 줄이기 때문에 VOC의 소각처리 효율을 증가시킨다. 따라서 축열 축매소각장치의 운전 조건 선정에서 밸브의 전환 주기는 이 모든 사항을 고려하여 결정되어야 함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

실제 공정에 적용시킬 수 있는 장치를 개발하기 위해 백금담지 하니컴 축매의 반응특성을 분석한 결과 톨루엔의 축매연소 반응은 120 °C에서 개시되고, 250 °C 이하 온도에서 완전연소 됨을 확인하였고, 톨루엔의 농도가 반응속도에 미치는 영향이 매우 적음을 알 수 있었다. 낮은 농도의 VOC를 소각처리 시키는데 매우 유용한 장치로 알려진 축열 축매소각장치를 제작하고, 톨루엔으로 만든 모사 VOC를 이용한 특성 분석 실험에서 톨루엔의 농도가 150 ppm 이상 되면, 보조 열을 공급하지 않아도 시스템이 안정화되었고, 밸브가 전환될 때 미반응 톨루엔이 배출되지만 95% 정도의 높은 VOC 소각 처리 효율을 얻을 수 있었다. 또한 밸브의 전환온도를 높이면 주기가 길어지지만 배출가스의 온도상승으로 인해 단위시간당 배출되는 열량이 증가함을 확인하였다. 축열체의 양을 증가시키면 열저장 및 방열량이 증가되므로 밸브의 전환주기를 길게 하여 처리효율을 높일 수 있는데, 밸브의 전환주기 설정은 처리효율, 시스템의 열손실, 밸브가 전환될 때 미반응 가스의 양 및 배출가스가 갖고 나가는 열량의 함수로 결정됨을 확인하였다.

#### 감 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Moretti, E. C. and Mulhpadhyay, N., "VOC Control: Current Practices and Future Trends," *Chem. Eng. Progress*, **89**(7), 20-26(1993).
- Pfefferle, L. D. and Pfefferle, W. C., "Catalysis in Combustion," *Catal. Rev.-Sci. Eng.*, **29**(2, 3), 219-267(1987).
- Klvana, D., Song, K. S. and Kirchnerova, J., "Catalytic Performance of  $\text{La}_{0.66}\text{Sr}_{0.34}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  Perovskite in Propane Combustion: Effect of Preparation and Specific Surface Area," *Korean J. Chem. Eng.*, **19**(6), 932-939(2002).
- Song, K. S., Kang, S. K. and Kim, S. D., "Preparation and Characterization of  $\text{Ag}/\text{MnO}_x/\text{Perovskite}$  Catalysts for CO Oxidation," *Catal. Lett.*, **49**, 65-68(1997).
- Cho, S. J., Ryoo, M. W., Song, K. S., Lee, J. H. and Kang, S. K., "A Catalytic Combustion Technology of Concentrated VOCs in Textile Coating Process," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(4), 478-481(1999).
- Matros, Y. S., "Performance of Catalytic Processes under Unsteady Conditions," *Chem. Eng. Sci.*, **45**(8), 2097-2102(1990).
- Matros, Y. S. and Bunimovich, G. A., "Reverse Flow Operation in Fixed Bed Catalytic Reactor," *Catal. Rev.-Sci. Eng.*, **38**(1), 1-68(1996).
- Neophytides, S. G. and Froment, G. F., "A Bench Scale Study of Reversed Flow Methanol Synthesis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 1583-1589(1992).
- Blanks, R. F., Wittring, T. S. and Peterson, D. A., "Bidirectional Adiabatic Synthesis Gas Generator," *Chem. Eng. Sci.*, **45**(8), 2407-2413 (1990).
- Haynes, T. N., Georgakis, C. and Caram, H. S., "The Application of Reverse Flow Reactors to Endothermic Reactions," *Chem. Eng. Sci.*, **47**(9-10), 2927-2932(1992).
- Matros, Y. S., "Unsteady State Oxidation of Sulphur Dioxide for Sulphuric Acid Production," *Sulphur*, **183**, 23-29(1986).
- Eigenberger, G. and Nieken, U., "Catalytic Cleaning of Polluted Air: Reaction Engineering Problems and New Solution," *Int. Chem. Eng.*, **34**(1), 4-16(1994).
- Beld, L., van Westerterp, K. R., "Operation of a Catalytic Reverse Flow Reactor for the Purification of Air Contaminated with Volatile Organic Compounds," *Can. J. Chem. Eng.*, **75**, 975-983(1997).
- Hodnett, B. K., "Heterogeneous Catalytic Oxidation," John Wiley & Sons, Chichester, England(2000).
- Haynes, T. N., Georgakis, C. and Caram, H. S., "The Design of Reverse Flow Reactors for Catalytic Combustion Systems," *Chem. Eng. Sci.*, **50**(3), 401-416(1995).