

# 복합열산화(Hybrid Thermal Oxidation) 시스템을 이용한 MEK(Methyl ethyl ketone)와 Toluene 제거 평가

## Evaluation of Hybrid Thermal Oxidation(HTO) System for Removal of MEK(Methyl ethyl ketone) and Toluene

장 두 훈<sup>1)</sup> · 배 우 근<sup>2)</sup> · 김 문 일<sup>3)</sup> · 김 경 태<sup>†</sup>

Jang, Duhun · Bae, Wookeun · Kim, Moonil · Kim, Kyungtae

**ABSTRACT :** In this study, optimization of MEK and Toluene removal was conducted by HTO(Hybrid Thermal Oxidation) system. HTO system has a multi-bed reaction plate and the plate consisted of wasted heat regeneration part and catalysis part. VOCs removal by HTO system was estimated by changing inlet flow rates with different valve changing times. Under 350°C of combustion temperature, VOCs was fully converted and the equivalent conversion was 100%. The thermal oxidation efficiency, related to the amount of injected fuel into HTO system and the valve change time, was revealed at the level of 93.0~96.3%. In case of MEK removal by HTO system, the efficiency was ranged from 91.1 to 97.1%. Also, Toluene removal efficiency(93.2~97.4%) was good and stable with respect to the operating conditions. Considering above results, it was proved that HTO system could be a stable and compact system for VOCs, especially MEK and Toluene with high removal efficiency.

**Keywords :** HTO(Hybrid Thermal Oxidation), VOCs, MEK, Toluene, Wasted heat regeneration

**요 지 :** 본 연구에서는 multi-bed 플레이트로 폐열재생 부분과 촉매반응 부분으로 구성되어 있는 복합열산화 시스템(Hybrid Thermal Oxidation System)을 이용하여 저온에서 주입 밸브 교체 시간간격과 유입유량을 변화시켜 VOCs(MEK와 Toluene) 제거를 평가하고자 하였다. 350°C의 연소온도 조건에서 VOCs는 완전히 전환되었으며 당량비에 따른 전환율 또한 100%에 근접하였고, HTO 시스템의 연소실은 좌우측의 온도가 균형을 이루며 열효율이 매우 높아 폐열회수 및 재생이 효율적이었다. 주입 밸브 교체 시간간격과 유입 유량 변화에 따른 HTO시스템에서의 VOCs 제거 효율은, MEK와 Toluene 모두 안정적으로 높은 91.1~97.4%의 효율을 나타내었으며, 보조연료량 증가보다는 밸브교대시간을 길게 하였을 때 제거 효율이 증가하는 경향을 보여 보조연료량 증가보다 밸브교대시간을 증가시키는 것이 제거 효율을 높이는 데 효율적으로 판단된다. 이와 같은 연구결과를 고려할 때 HTO시스템은 저온에서도 VOCs 제거, 특히 MEK과 Toluene 제거에 매우 안정적이며 콤팩트한 시스템으로 판단되며, 적은 설치 부지로 중소기업이 요구하는 새로운 VOCs 제거 시스템으로 적용 가능하리라 판단된다.

**주요어 :** 복합열산화, 휘발성 유기화합물, MEK, 톨루엔, 폐열재생

## 1. 서 론

최근 들어 대도시의 대기오염은 오존과 같은 광화학 산화제에 의해 더욱 악화되고 있으며, 광화학 산화제의 주요 원인물질 중 하나는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds; VOCs)이다(Derwent 등, 2000; 김영성 등, 1998). VOCs는 탄소와 수소만으로 구성된 탄화수소류와 할로겐화 탄화수소, 질소와 황화합물, 탄화수소 등 상온, 상압에서 기체 상태로 존재하는 모든 유기화합물을 총칭하는 의미로 사용된다. VOCs는 방향족탄화수소와 할로겐탄화수소와 같이 주로 대기중의 광화학반응에 참여하여 광화학탄화물 등의 2

차 오염물질을 생성할 수 있다(Komilis 등, 2004; 최원욱 등, 1998). VOCs는 인체에 직접적으로 유해하여 발암성이나 돌연변이성 같은 영향이 나타나는 것으로 알려져 세계 각국에서는 VOCs의 감소에 많은 관심을 기울이고 있다(Hester 과 Harrison, 1998; Barbara 등, 1996).

우리나라의 휘발성 유기화합물(VOCs) 관리대상물질은 휘발성이 높은 Benzene, Toluene, Methyl Ethyl Ketone(MEK) 등 37개 물질이며(환경부, 2009), 관리업종은 석유화학업, 유기용제업, 자동차정비시설, 주유소 등 10개 업종이다. 규제대상 VOCs 배출업체는 2,119개소이며 이중에서 수도권 지역이 1,552개소로 90%를 점유하고 있다(환경부, 2002).

1) 비회원, (주)제이텍 대표이사

2) 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

3) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수

† 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : adase7@naver.com)

기존 중소, 영세기업에서 VOCs 제거시설을 설치하여 운영하고 있지만 고효율 VOCs 저감 억제, 배출시설을 운영하기보다는 저가시설 위주로 설치, 운영하고 있으며 사후관리도 부실한 실정이다. 효과적인 운영을 하기 위해서는 VOCs 처리비용 저감에 의한 설비의 경제성 향상, 설비의 크기 축소를 통한 설치효율 증대, 운전기능 및 신뢰성 향상 등이 이루어져야 한다. VOCs를 경제적이고 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 방지기술의 선정이 선행되어야 하며 조성 및 농도, 온도, 작업동선, 설치면적, 2차오염, 처리대책, 사용연료 등 각종 데이터를 종합적으로 검토하여 가장 경제적이고 효과가 큰 VOCs 제거방법을 선택하여야 한다.

그림 1과 같이 VOCs 배출제거기술의 종류는 크게 분해(Destruction)와 회수(Recovery)로 나눌 수 있다(Khan과 Ghoshal, 2000). 흡착법(Adsorption)은 운전 시 발생하는 폐수와 소모된 흡착제를 처리해야 하는 단점을 가지고 있다. 생물여과법(Bio-filtration) 중 바이오 필터를 이용한 방법은 운전비가 적고 2차 오염물의 발생이 거의 없지만 염소화합물의 처리 효율이 낮고, 넓은 부지면적을 요구하며 미생물제어 운전이 요구된다. 광촉매(Photocatalytic) 기술은 반영구적으로 사용할 수 있고 인체에 무해하다는 장점이 있으나 다른 방법에 비해 제거 효율이 낮아 저농도의 VOCs제거에만 적용할 수

있다(서봉국 등, 2003).

표 1은 일반적인 VOCs의 제어 기술의 제거 효율을 비교한 것으로 VOCs 농도가 200ppm이상에서 활성탄 흡착(Carbon Adsorption)과 흡수(Absorption), 농축(Condensation)이 높은 제거 효율을 나타냈다. 그 중 활성탄 흡착(Carbon Adsorption)의 경우 200ppm에서 50%정도의 저효율을 나타내는 반면, 흡수(Absorption)는 200~5000ppm에서도 90%이상 높은 제거 효율을 가지고 있는 것으로 나타났다. 200ppm이하의 VOCs 제어 기술은 열소각(Thermal Oxidation), 촉매소각(Catalytic Oxidation)이 있는데, 열소각 방법은 촉매소각에 비해 저농도에서도 높은 VOCs 제거 효율을 나타내고 있다.

본 연구에서는 기존의 열소각 기술에 촉매 반응대로 구성된 복합열산화시스템(Hybrid Thermal Oxidation System; 이하 HTO 시스템)에 500~2000ppm의 MEK와 Toluene을 주입하여 저온에서 낮은 운전비로 VOCs 중 MEK와 Toluene 제거 효율과 폐열재생의 최적운전조건을 도출하고 HTO 시스템을 최적화하여 중소기업에서 작은 장치공간에도 높은 제거 효율로 경제적 부담없이 설치 및 운영 가능한지 평가하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 분석 방법

VOCs 중 MEK, Toluene 분석을 위해서 GC/FID의 TCEP 칼럼을 사용하여 반응 후의 가스를 분석하였다. 온도 측정에 사용한 온도센서의 열전대는 K-type을 사용하였으며, 분석조건은 표 2와 같다. 또한 각각 측정된 온도는 전용 데이터로거를 이용하여 1초 단위로 저장하였다. 제조된 촉매의 구성성분과 조성을 x-ray diffraction(XRD), ICP-OES, EDAX 방법을 이용하여 분석하였다.

### 2.2 촉매 반응성실험

연료의 당량비에 따른 촉매의 전환율과 촉매층의 온도

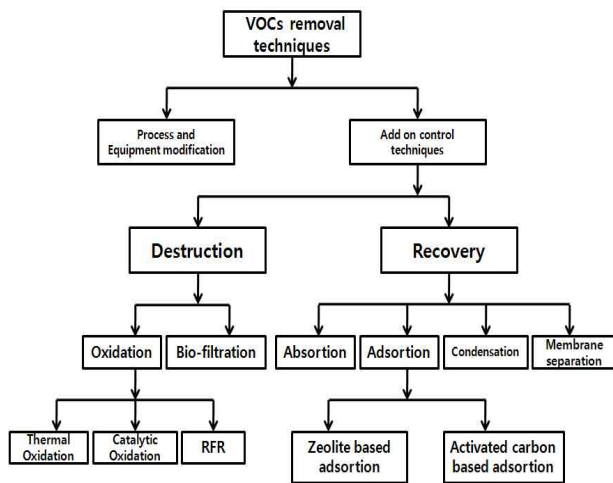


그림 1. VOCs 제거 기술

표 1. VOCs 제거기법 중 산화기법에 대한 요약

처리기술	개요	장점	단점
직접연소법	약 750℃로 가열하여 무해한 탄산가스 및 물로 분해처리	다양한 VOCs 처리가능 고농도에 경제적	폐열회수가 없으면 운전비 높음 온도에 따라 완전처리 불가능 Nox 발생량이 많음
촉열연소법	높은 열효율의 연소장치 800~950℃로 가열산화분해	높은 연소온도로 완전처리 고농도에서 낮은 운전비	장치공간이 넓은 높은 장치설비투자비
촉매연소법	촉매에 의해 300~500℃의 비교적 저온에서 산화분해	비교적 낮은 운전비 중-고농도에 적합 NOx 발생량이 적음	촉매 노화물질 대책필요 높은 촉매 교환 비용

표 2. HTO 효율 분석방법

항목	분석장비/기기	비고
VOCs(MEK, Toluene)	GC/FID(Agilent) Precolumns(OV-101) Analytical Columns(TCEP)	Inlet 250℃ Detector FID 250℃ Oven Temp. 90℃
촉매 구성성분	x-ray diffraction(XRD) ICP-OES 4300DV(perkin-elmer, Co., U.S.A.)	
온도측정(온도센서열전대)	K-Type	
유입가스 유량	부유식 유량계	

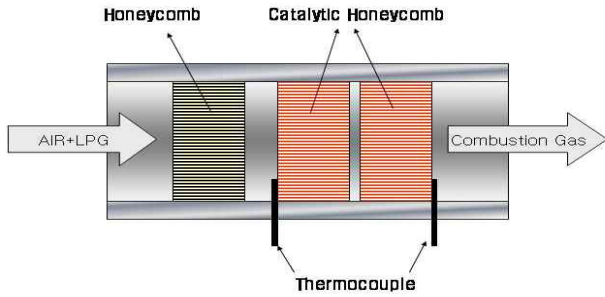


그림 2. 하니컴 촉매반응기

변화를 관찰하기 위한 연소실험 장치는 그림 2와 같이, 촉매층은 직렬로 2개를 설치하였으며 연소실험 장치 내의 균일한 유속을 유지하기 위하여 100cell/inch<sup>2</sup>의 세라믹 하니컴 촉매를 설치하였다.

HTO 시스템에 적용된 촉매는 세라믹 하니컴 구조체를 가진 고상 촉매이다. 고상 촉매는 비교적 가격이 저렴하며 지지체로 쓰이는 세라믹 하니컴에 안정적 공급이 가능하고 일반적인 VOCs 가스에 적합한 150cell/inch<sup>2</sup>의 세라믹 하니컴에 담지된 백금촉매를 선정하여 적용하였다. 연소용 연료는 LPG와 공기를 혼합하여 사용하였으며, 공기 유량은 60m<sup>3</sup>/hr로 일정하게 하였으며, 촉매층에서의 예열온도는 250℃로 설정하였다. 이때, 촉매 연소 개시온도는 200℃로 하였다.

### 2.3 Pilot Scale 실험

촉매 연소실험을 통하여 설계인자를 평가한 후 그림 3과 같이 실제 VOCs 배출업체에 적용할 수 있는 Pilot Scale HTO 시스템 실험장치를 제작하였다. HTO시스템은 다른 유사한 방지시설에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 운전하기 때문에 외부로의 열 방출을 최대한 차단해야 한다. 이를 위하여 연소실 제작 시에 bulk 세라믹에 의해 생기는 공극을 방지하였으며, 특히 촉매와 축열재 부분을 완전 밀폐시켜 열손실이 발생하지 않도록 하였다. 또한, 촉매와 축열재가 위치하는 부분의 시공에서 각 단의 받침이 본체와 연결되어 있어, 전도에 의한 열손실이 발생할 수 있으므로 본체와의 연결을 최소화 할 수 있도록 온도가 낮은 부분만 연결시켜 열

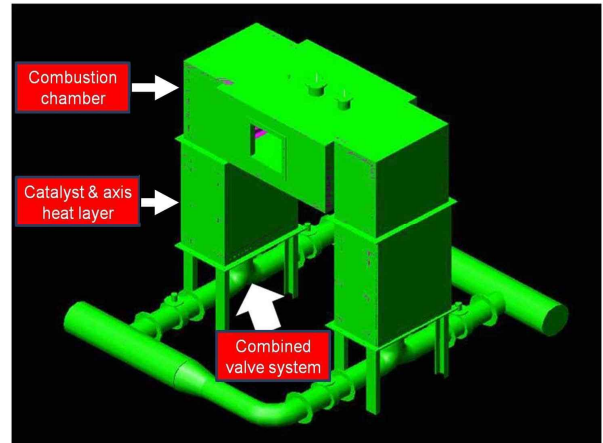


그림 3. Hybrid Thermal Oxidation (HTO) Pilot plant

손실을 최소화하였다.

HTO 시스템의 연소실 상부에는 내부 압력 측정 및 가스 누출 확인을 위한 압력 측정기를 설치하였으며, HTO 시스템 전후에는 실험용 VOCs의 공급과 산화된 가스의 배출을 위한 송풍기를 각각 장착하였다. 그리고 압력측정구에 수주마노미터를 연결하여 HTO 시스템이 운전되는 동안 미세부압(negative gauge pressure)이 발생되도록 송풍기의 회전수를 조절하였다. 유입가스의 유량은 송풍기의 출구에 연결된 부유식 유량계를 이용하여 측정하였다.

대상물질인 MEK와 톨루엔은 염소(Cl)를 함유하고 있지 않은 VOCs이며, 연소실 체적(용량)은 연소실 열부하율과 가스의 열입력을 적용한 결과 약 0.1m<sup>3</sup>으로 산정되었으며 실험장치의 처리용량은 최대 200Nm<sup>3</sup>/hr로 하였다. 또한, 축열재의 물성과 운전자료를 적용한 결과 폐열 재생에 필요한 축열재량은 10.175kg으로 산정되었으며, 보조연소를 위한 버너의 용량은 연소기의 배기가스, 벽면을 고려한 결과 약 5,000kcal/hr로 산정되었다. 연소를 위한 보조 연료와 VOCs 함유량이 적을 경우 적정온도 유지를 위해 LPG를 사용하였다.

VOCs 함유 가스의 온도와 처리시스템을 거친 후의 출구 배기가스 온도는 일반적인 처리장치의 설계온도인 30℃와 80℃로 가정하였다. 연소실 온도는 VOCs의 산화조건에 의해서 결정되는데, 본 연구에서는 촉매에서의 산화온도를 400℃

표 3. VOCs 제거를 위한 HTO 운전조건

Valve changing time (sec)	Flow rate (mL/min)	Inlet concentration (ppm)	
		MEK	Toluene
15	5	537	1,080
	7	750	1,539
	10	1,088	2,190
30	5	506	1,101
	7	620	1,577
	10	897	2,230
45	5	424	1,086
	7	615	1,481
	10	891	2,121
60	5	308	1,024
	7	625	1,528
	10	945	2,200

로 설정하였다. 하지만 안정적인 VOCs 산화를 위하여 연소 실 온도를 400°C보다 훨씬 높일 수 있도록 설계하였다.

HTO시스템을 이용한 VOCs 제거 실험은 표 3에서 보는 바와 같이, 유입밸브교대시간은 15, 30, 45, 60초로 설정하였다. 설정된 밸브교대시간에 액상의 MEK와 Toluene를 15초와 30초에서는 5, 7, 10mL/min으로 주입하였고, 45초와 60초에서는 5, 7, 10, 20mL/min으로 주입하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 촉매 구성성분 분석

촉매의 구성 성분을 조사하기 위하여 x-ray diffraction(XRD)를 사용하였다. 그 결과 촉매의 구성 성분은 주로  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ 의 cordierite로 이루어졌음을 알 수 있었다. 그 밖의 성분들은 cordierite 성분의 피크들로 인하여 더 자세히 알아내기 어려웠다.

그리고, ICP-OES와 EDAX법을 이용하여, 다른 성분 등도 관찰하였다. 그 결과 0.26wt% Pd, 0.13wt% Pt, 4.45wt%  $CeO_2$  등의 성분들로 촉매가 이루어졌으며, Pt와 Al의 성분 함량은 Pt 3.07ppm, Al 128ppm으로 분석되었다. 그림 4는 촉매 하니컴을 Scanning Electron Microscope(SEM)을 통해서 관찰하였다. 촉매코팅이 되어있지 않은 부분과 촉매코팅이 되어있는 부분, 코팅부분을 확대한 사진이다. (C)의 코팅 두께는 약 200nm정도이며, 코팅면의 두께가 비교적 균일한 것을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 연소온도와 당량비에 따른 촉매 반응성 평가

촉매의 반응성을 살펴보기 위하여 사용한 하니컴 촉매의

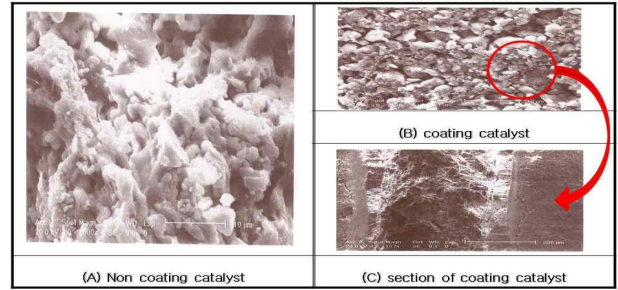


그림 4. 촉매표면 코딩 전 후 SEM 촬영

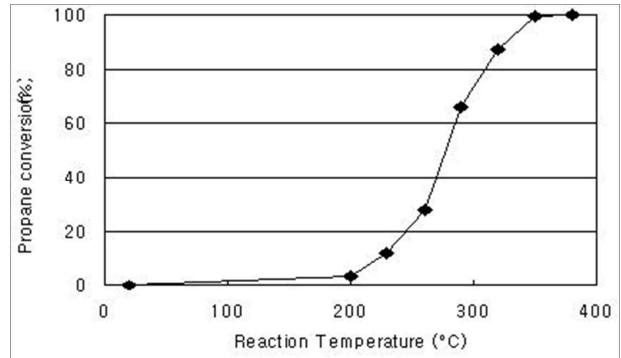


그림 5. 반응 온도에 따른 프로판 전환율

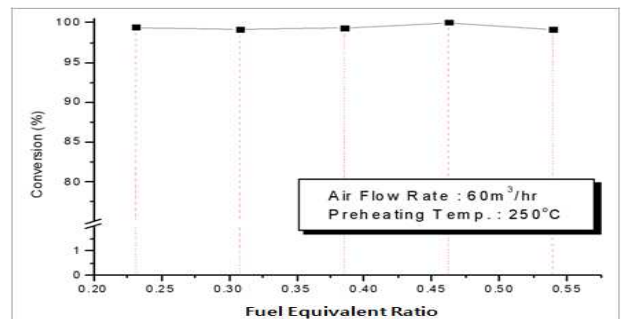


그림 6. 연료 당량비에 따른 프로판 전환율

일부를 분취하여 quartz tube 반응기에 담아 실험 하였다. 반응물은 LPG와 공기를 섞은 혼합가스를 사용하였다. 반응온도는 상온에서 400°C까지 증가시켰으며, 이때 반응 후 가스 성분은 GC/FID를 이용하여 분석하였다. 그 결과 그림 5에서 보는 바와 같이 반응온도를 약 200°C까지 증가하여도 반응율은 거의 증가하지 않았으나, 200°C 이후에 반응율이 급격히 증가하여 약 300°C에서 75%의 프로판 전환율을 보였으며, 약 350°C 이상에서 100%에 가까운 전환율을 보였다.

공기 유량 60m³/hr, 예열온도 250°C로 고정시킨 후, 보조 연료량을 조절하여 0.2~0.55 범위에서 당량비를 변화시켰다. 일반화염의 연소한계는 0.5인데 반해 훨씬 낮은 당량비(약 0.2)에서도 전환율은 100%에 근접하여 촉매연소 반응이 안정적이었다(그림 6). 따라서 실제 산업현장에서 발생하는 화염연소가 불가능한 희박한 VOCs에 대해 촉매를 이용한 직접연소 처리가 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 HTO 시스템 연소실 온도 평가

연료량을 4L/min으로 고정하고, 밸브교대시간을 15, 30, 45, 60초로 각각 변경하였을 때의 연소실 온도는 370~420°C를 보였다. 또한, 배기온도는 30~40°C를 보여, 밸브교대시간에 관계없이 열효율은 93.0~96.3%로써 우수한 열효율을 나타내었다. 연료량이 5L/min 경우에는 밸브교대시간에 따라 연소실 온도가 400~420°C, 배기온도는 35~40°C로써 연료량 4L/min와 유사한 수준을 보였으나, 열효율은 94.8~95.6%로써 다소 높은 수준을 보였다. 연료량을 각각 달리하였을 경우에도 열효율은 93.6~96.3%로 평가되어, HTO 시스템의 열효율이 매우 높아, 폐열회수 및 재생이 효율적임을 알 수 있었다. 또한, HTO 시스템의 좌우측에서 동시 측정된 온도는 그림 7에서 보는 바와 같이, 비교적 좌우 온도가 균형을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 HTO 시스템의 구성이 거의 대칭으로 이루어져 유동의 쏠림 현상이 거의

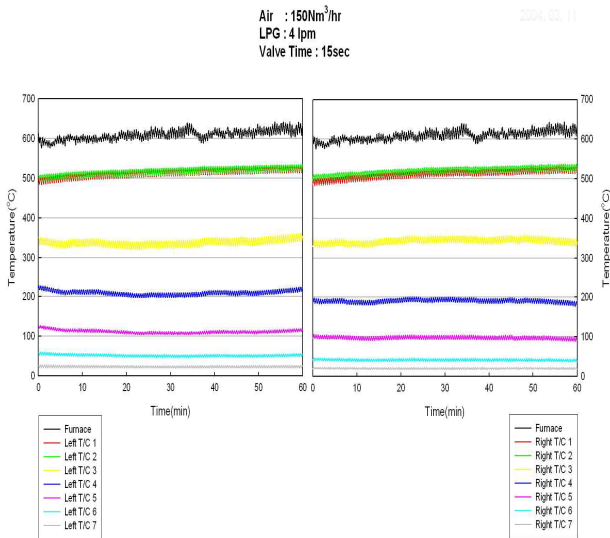


그림 7. 연소실 좌우측 온도 평가

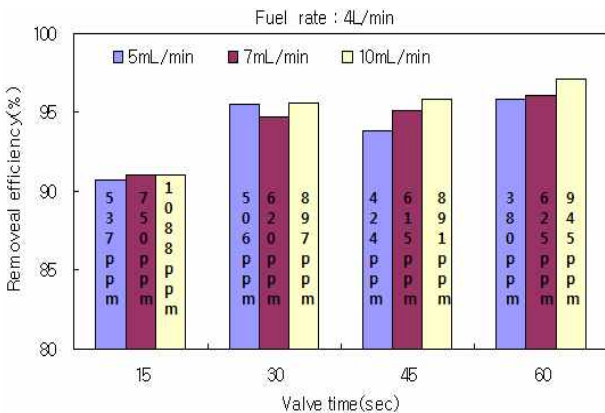
없다고 판단된다.

### 3.4 HTO 시스템을 이용한 MEK 제거 효율

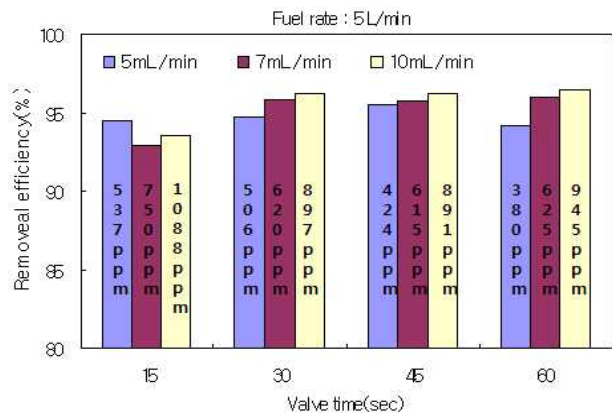
HTO 시스템을 이용한 MEK 제거 실험은 밸브교대시간과 MEK의 처리가스 농도 변화를 주면서 평가하였다. 먼저 HTO 시스템의 처리유량을 150Nm<sup>3</sup>/hr로 고정된 후, 밸브교대시간을 15, 30, 45, 60초로 각각 변경하고, MEK의 주입유량은 5, 7, 10mL/min, 보조연료량은 4, 5L/min으로 각각 변경하였다.

그림 8의 (a)에서 보조연료량을 4L/min하였을 때, MEK 주입량을 기준으로 하여 밸브교대시간에 따른 제거 특성을 보면, MEK의 주입량을 5mL/min으로 고정하였을 때 밸브교대시간에 따라 90.7~95.9%의 제거 효율을 보였다. MEK 주입량을 7, 10mL/min으로 하였을 경우에는 밸브교대시간에 따라 각각 91.1~96.1%, 91.1~97.1%의 처리효율을 보였다. 대체로 MEK 주입량이 늘어남에 따라 제거 효율도 증가했는데 이는 주입량에 따라 발열량도 증가하고 이에 유입되는 공기의 온도가 증가됨으로 판단된다. 그림 8(b)에서 보조연료량을 5L/min으로 하였을 경우, MEK 주입량을 5mL/min으로 고정하고 밸브교대시간을 각각 달리하였을 때, 94.2~95.5%의 제거 효율을 보였으며, 7, 10mL/min으로 하였을 때에는 각각 93.0~96.0%, 93.5~96.2%를 보여, 보조연료량 4L/min과 유사한 수준을 보이고 있다.

밸브교대시간에 대해서는 보조연료량 4L/min, 밸브교대시간 15초인 조건에서 낮은 제거 효율을 보였고 다른 조건에서는 모두 유사한 높은 제거 효율을 보였다. 이는 밸브교대시간을 15초로 운전하였을 경우에는 열 교환이 충분치 않아 예열온도에 영향을 주지 못함으로 판단된다. 실제 사용 시에는 운전비용과 직접적인 관련이 있는 보조연료량을 적게 하고, 밸브교대시간을 증가시키는 것이 경제적이며 실제



(a) Fuel rate: 4L/min



(b) Fuel rate: 5L/min

그림 8. 밸브교대시간에 따른 MEK 제거 효율 비교(Flow rate: 150m<sup>3</sup>/hr, Inlet concentration was shown in the bars.)

현장에 유입 VOCs 농도가 변화하더라도 처리효율에 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

### 3.5 HTO 시스템을 이용한 Toluene 제거 효율

HTO 시스템을 이용한 Toluene 제거 실험조건은 MEK 제거 실험과 동일하게 밸브교대시간과 Toluene의 가스 농도에 변화를 주면서 평가하였다.

그림 9(a)에서 보조연료량을 4L/min으로 하였을 경우, 주입량을 5mL/min으로 고정하였을 때 밸브교대시간에 따른 제거 효율은 각각 93.5, 95.4, 97.0, 97.2%를 보였다. 이는 동일한 조건으로 실험을 실시 한 MEK에 비해 다소 높은 제거 효율이다. 그리고 Toluene 주입량을 7, 10mL/min으로 하였을 경우에는 밸브교대시간에 따라 각각 93.2~96.4%, 93.1~97.2%를 보였다. Toluene의 경우에는 주입량에 따라 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 연소시 발열되는 발열량이 MEK보다 낮음으로 판단된다. 밸브 교대시간을 기준으로 Toluene의 주입량에 따른 제거 특성을 보면, 밸브 교대시간을 15초로 하고, 주입량이 5, 7, 10mL/min일 때, 제거 효율은 93.5~94.6%로써 주입량에 상관없이 거의 일정한 수준을 유지하였다.

그림 9(b)에서 보조연료량을 5L/min으로 하였을 경우, Toluene 주입량을 5mL/min으로 고정하고 밸브교대시간을 각각 달리하였을 때, 93.5~97.4%의 제거 효율을 보였다. 이는 보조연료량 4L/min와 거의 유사한 수준의 제거 효율이다. 그리고 Toluene 주입량을 7, 10mL/min으로 하였을 때에는 각각 94.0~97.4%, 94.0~97.1%를 보여, 보조연료량 4L/min와 거의 유사한 수준의 제거 효율을 보였다.

결론적으로 MEK 제거 효율 특성과 유사하게, 보조연료량에 따라서는 밸브교대시간을 15초에 하였을 때만 다소 차이를 보이고 있을 뿐, 밸브교대시간을 증가 시켰을 때에는

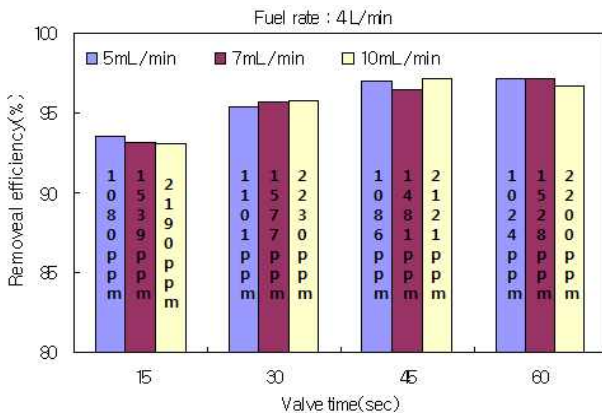
유사한 제거 효율을 보였는데 실제 사용 시에는 운전비용과 직접적인 관련이 있는 보조연료량을 적게하고, 밸브교대시간을 증가시키는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한, MEK와 같이 동일한 HTO 시스템의 운전조건을 적용하여도 높은 제거 효율을 보일 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

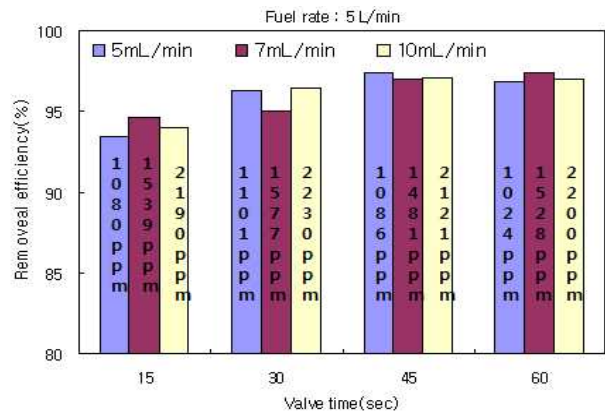
본 연구에서는 중소규모의 VOCs 배출원에 적합한 저감장치로써 폐열재생과 촉매로 구성된 multi-bed 구조 반응대를 가진 HTO 시스템의 VOCs 중 MEK, Toluene의 제거를 평가하고자 하였다.

HTO 시스템의 성능을 검증하기 위하여 VOCs 중 MEK와 toluene을 대상으로 하여 VOCs농도, 밸브교대시간, 보조연료농도에 따른 제거 실험을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연소온도에 따른 전환율은 연소실 온도가 200℃부터 서서히 증가하여, 약 350℃에서 100%에 가까운 전환율을 보였으며, 당량비에 따른 전환율의 경우, 본 연구의 당량비 범위인 0.2~0.55에서 100%에 가까운 높은 전환율을 보였다.
- (2) HTO 시스템의 연소실은 연료량, 밸브교대시간의 변화에도 좌우 온도가 균형을 이루며, 열효율은 매우 높은 93.6~96.3%로 평가되어 폐열회수 및 재생이 효율적이라 판단된다.
- (3) HTO 시스템을 이용한 MEK와 toluene 제거 실험결과, 제거 효율은 MEK와 toluene의 주입량이 많아질수록 제거 효율이 조금씩 높아지는 경향을 보였는데 이는 농도가 증가함에 따라 발열량의 증가로 판단되며 제거 효율



(a) Fuel rate: 4L/min



(b) Fuel rate: 5L/min

그림 9. 밸브교대시간에 따른 Toluene 제거 효율 비교 (Flow rate: 150m<sup>3</sup>/hr, Inlet concentration was shown in the bars.)

범위는 MEK가 91.1~97.1%, toluene이 93.2~97.4%로써 모두 높고 안정적인 제거 효율을 보여 실제 현장에서 VOCs의 농도가 변화하더라도 큰 영향이 없을 것이라 판단된다.

- (4) 동일한 MEK와 toluene 주입량에서 밸브교대시간을 15에서 60초까지 변화시키며 실험한 결과, 보조연료량 증가보다는 밸브교대시간을 길게 하였을 때 제거 효율이 증가하는 경향을 보여 보조연료량 증가보다 밸브교대시간을 증가시켜 유입되는 공기의 예열온도를 증가시켜 제거 효율을 높이는 것이 효율적이라 판단된다.
- (5) 본 연구에서 평가한 HTO 시스템은 비교적 낮은 온도에서 고농도의 VOCs를 안정적으로 제거 및 운전할 수 있음을 보여 실 공정에 적용 가능하리라 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김영성, 송철한, 심상규, 김용표, 문길주(1998), 여천공업단지 봄, 가을 대기 중 휘발성유기화합물 농도 비교 연구, *한국대기보전학회지*, Vol. 14, No. 2, pp. 153~160.
2. 서봉국, 나영수, 송승구(2003), 휘발성 유기 화합물(VOSs) 처리기술, *한국환경과학회지*, Vol. 23, No. 7, pp. 825~833.
3. 최원옥, 김윤신, 박태술, 전준민(1998), 공단지역 유해대기오

염물질에 대한 인체위해도 평가에 관한 연구, *환경과 산업의 화학회지*, Vol. 7, No. 1, pp. 1~13.

4. 환경부(2009), *대기환경보전법* 1장 44조항.
5. 환경부(2002), *휘발성유기화합물(VOC) 관리현황 및 저감계획*, pp. 1.
6. Blasin-Aube, V., J. Belkouch, L. Monceaux(2003), General Study of Catalytic Oxidation of Various VOCs over La-Sr0-Mn0 Perovskite Catalyst Influence of Mixture, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 43, No. 2, pp. 175~186.
7. Barbara, Z., John, C. S., Gregory, H., Alan, W. G. and William, R. P.(1996), Volatile Organic Compounds up C20 Emitted from Motor Vehicles; Measurement Methods, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 12, pp. 2269~2286.
8. Derwent, R. G., Davies, T. J., Delaney, M., Dollard, G. J., Field, R. A., Dumitrean, P., Nason, P. D., Jones, B. M. R. and Pepler, S. A.(2000), Analysis and Interpretation of the Continuous Hourly Monitoring Data 26 C2-C8 Hydrocarbons at 12 United Kingdom Sites during 1996, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 297~312.
9. Hester, R. E. and Harrison, R. M.(1998), Air Pollution and Health, *The Royal Society of Chemistry*, Vol. 10, pp. 33~37.
10. Khan, F. I. and Ghoshal, A. K.(2000), Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 13, pp. 527~545.
11. Komilis, D. P., Ham, R. K. and Park, J. K.(2004), Emission of Volatile Organic Compounds during Composting of Municipal Solid Waste, *Water Research*, Vol. 38, pp. 1707~1714.

(접수일: 2010. 2. 1 심사일: 2010. 2. 10 심사완료일: 2010. 4. 5)