

# VOC 분해 플라즈마-덤프 연소기 특성 Characteristics of a Plasma-Dump Combustor for VOC Destruction

김은혁 · 전영남<sup>†</sup>  
Eun Hyuk Kim · Young Nam Chun<sup>†</sup>

조선대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, Chosun University

(Received May 22, 2015; Revised August 28, 2015; Accepted August 30, 2015)

**Abstract :** VOCs (Volatile Organic Compounds) are generally generated in the painting process, or at the company and laundry where use organic solvents. The VOCs consist of various hydrocarbons and has low calorific value due to its dilution with atmospheric air. Therefore, the VOCs are difficult to burn by a conventional fuel combustor. In this study, a novel plasma dump combustor was proposed for the treatment of low calorific VOC gases. This combustor was designed a combination of the characteristics in a plasma burner, a dump combustor and a 3D matrix burner. The combustor has good structure for maintaining enough residence time and reaction temperature for stable flame formation and VOC destruction. For investigating the performance characteristics of the plasma dump combustor, an experiment was achieved for VOC feed rate, VOC injector position, etc. Toluene was used as a surrogate of VOC. The novel combustor gave better performance than a conventional combustor, showing that VOC destruction rate and energy efficiency were 89.64% and 12.27 kg/kWh respectively, at feeding rate of 450 L/min of VOC of 3,000 ppm of toluene concentration.

**Key Words :** Plasma-dump Combustor, VOCs (Volatile Organic Compounds), Cavity Region, Toluene, VOC Decomposition

**요약 :** 휘발성 유기화합물인 VOCs (Volatile Organic Compounds)는 주로 도색 공정이나 유기용제를 사용하는 업체나 세탁소 등에서 발생된다. 이는 다양한 형태의 탄화수소로 구성되어 있으며 대기 중에 방출되어 희석되므로 그 농도가 낮아 발열량이 크지 않기 때문에 일반 연소기로는 직접 소각처리가 어렵다. 본 연구에서는 이와 같이 저열량 가스인 VOC를 처리하기 위해 새로운 형태의 플라즈마-덤프 연소기를 제안하였다. 이 연소기는 플라즈마 버너와 덤프 연소기 그리고 3D 매트릭스 버너의 특성이 조합된 형태로 이루어졌다. 따라서 본 연소기는 안정적인 화염형성과 VOC 분해에 필요한 충분한 분해온도와 체류시간을 확보할 수 있는 구조로 되어있다. 플라즈마-덤프 연소기의 성능특성을 규명하기 위해 모사 VOC를 톨루엔으로 하여 VOC 공급량과 농도 그리고 VOC 인젝터 위치 등에 대해 실험을 수행하였다. VOC 인젝터 위치를 바깥쪽으로 하여 톨루엔의 농도가 3,000 ppm인 VOC를 450 L/min 공급한 경우 VOC 분해효율이 89.64%이고 에너지 효율은 1.227 kg/kWh으로 기존의 연소기에 비해 우수한 성능을 보였다.

**주제어 :** 플라즈마 덤프 연소기, 휘발성 유기 화합물, 캐비티 영역, 톨루엔, VOC 분해

## 1. 서론

산업의 발달과 다양화로 인해 생활환경에 직접적 피해를 주는 대기 오염물 중 하나인 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compound, VOC)은 여러 다양한 작업공정에서 복합적인 성상의 형태로 배출되고 있다.

VOC는 대부분 신경계 마비 등을 유발하는 발암물질이며 악취 등의 직접적인 피해를 주기도 한다. 또한 대기 중에서 NOx와 공존 시 광화학 반응을 하여 오존을 생성하는 2차 오염을 유발하는 물질이기도 하다.<sup>1)</sup> 대기 중 문제가 되고 있는 VOC는 주로 인위적인 배출에 기인하며 그 배출원은 주로 도색공장이나 유기용제를 사용하는 작업장 그리고 자동차 운행 시 다량 배출된다.<sup>2)</sup>

VOC는 발생원에 따라 발생하는 성분이나 농도가 다르므로 이를 처리하는 방법이 다르게 적용되어야 한다. 일반적으로 VOC의 배출농도가 높고 그 성분의 종류가 적을 경우 공업적으로 회수가치가 있어 이를 재이용을 하게 되는데

그 처리방법은 주로 흡수법, 흡착법, 응축법을 이용하게 된다.<sup>2,3)</sup> 이외에 다른 처리 방법으로는 소각법이 있는데 이는 VOC를 구성하고 있는 성분이 복잡하고 재이용이 의미 없는 경우 적용이 유리하다. VOC의 발열량이 발화온도(flash temperature) 이상이 유지되면 높은 처리 효율을 가질 수 있다. 그러나 VOC가 대기 중 공기와 희석되어 발열량이 낮을 때 추가적인 보조연료가 필요하기 때문에 처리비용의 문제가 있다.<sup>4)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위해 상기에 언급된 기존의 기술을 조합하거나 플라즈마 처리기술과 같이 새로운 형태의 기술이 도입되어 시도되고 있다.<sup>3)</sup>

본 연구의 경우는 플라즈마 연소와 방전 분해, 덤프 캐비티 재순환 연소, 3차원 매트릭스 축열 초단열 연소기술을 융·복합적으로 적용하여 새로운 형태의 저발열량 열적처리 가스연소기를 개발하고자 하였다. 그 각 요소 기술들을 간략히 설명하면 다음과 같다.

본 실험에 적용된 플라즈마 방전은 고온 열플라즈마(Thermal Plasma)와 저온 플라즈마(Cold Plasma)의 특징을 동시에

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: ynchun@chosun.ac.kr Tel: 062-230-7156 Fax: 062-232-2474

가지고 있는 글라이딩 아크 방전(Gliding Arc Discharge)의 형태가 적용되었다. 이는 상압 조건에서 생성될 수 있는 다른 플라즈마와 비교하여 플라즈마 방전 영역과 에너지 밀도가 높은 특징을 가지고 있어 처리효율과 에너지 효율이 높다.<sup>4)</sup> 글라이딩 아크 플라즈마 방전은 일정 간격으로 설치된 칼날 형태(knife type)의 방전 극 사이로 처리가스가 공급되면 방전날 하단 끝에서 초기 절연 파괴(breakdown)가 일어나게 되어 전극날 상부로 점차 방전영역을 넓혀가며 확장된다. 이 때 플라즈마 방전 에너지 손실이 점차적으로 증가하면서 방전날 끝에서 방전이 완전히 소멸하게 된 후, 이 과정이 지속적으로 반복된다.<sup>5)</sup> 덤프 연소기(Dump Combustor)는 캐비티 영역(Cavity region)이 존재하는 구조의 형상으로 이루어져 있다. 따라서 연소기내 연소가스가 배출되기 전에 재순환 영역에서 연소가스의 체류시간이 기존의 연소기에 비해 길어져 연소성이 증가된다.<sup>6)</sup> 그리고 출구에 3차원 초단열 매트릭스 버너는 연소가스가 내부 공간에서 3차원적으로 축열되어 완전연소를 달성하는 방식으로 저발열량 혼합기 완전 연소분해가 가능한 방식이다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 이미 언급된 바와 같이 상기 3가지 기술이 융합된 새로운 형태의 일체형 플라즈마-덤프 연소기를 제안하였다. 제안된 연소기의 구조는 중앙 하단부에 플라즈마 버너가 위치해 있는데, 이는 버너 시동과 저발열량 연료의 지속적 연소유지가 가능하도록 하였다. 그리고 연소기 주 몸체를 이루고 있는 덤프 연소기는 캐비티 재순환 영역이 존재하여 VOC 가스의 완전분해 처리가 가능하도록 되어있다. 그리고 연소기 중심 후단부에 다공성 재질의 3차원 매트릭스 버너가 설치되어 미연된 가스를 완전연소 분해하는 구조로 되어있다.

이와 같이 새로이 제안된 플라즈마-덤프 연소기에 대해 VOC 분해 성능확인과 최적 운전조건을 제시하기 위해 처리가스 유량, VOC 주입위치와 농도, 축열 차폐기 설치여부에 대해 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구의 실험에 사용된 장치는 플라즈마-덤프 연소기, 가스 공급라인, 전원 공급장치, 모니터링 및 분석라인으로 구성되어 있으며 Fig. 1과 같다.

플라즈마-덤프 연소기는 직사각형의 형태의 덤프 연소기(가로: 714 mm, 세로: 530 mm, 폭: 120 mm)와 그 덤프 입구 가운데에 3상 글라이딩 아크 플라즈마 버너가 설치되어 있고 출구 쪽에 3차원 매트릭스 버너가 위치되어 있는 구조이다.

가스공급라인은 톨루엔과 공기가 일정비율로 혼합된 모사 VOC의 공급과 보조 연료인 메탄과 연소용 공기가 공급되는 라인이다. 플라즈마-덤프 연소기로 공급되는 예열된 공기 공급관내로 액체 이송펌프(Pump : QG150, Head : RHK1CKC-Injae Science)를 이용하여 톨루엔을 설정된 양으로 일정하게 공급하여 공급관 내에서 기화시켜 일정량 모사 VOC가 플라즈마 버너와 상단부 VOC 인젝터(Injector)로 각각 공급이 된다. 공기의 예열은 공기 공급관에 터빈타입 열풍전기 히터(단상 220 V, 3 kW)를 설치하여 관 내부의 온도를 170 °C로 일정하게 유지되도록 하였다. 그리고 메탄과 공기는 각각 MFC와 볼타입 유량계에 의해 각각 측정 조절된 후 플라즈마 버너로 공급되었다.

전원 공급장치(Model UAP-15K1A, Unicon Tech., Korea)는 플라즈마 버너로 3상 교류전원을 공급하는 공급장치로 최대 15 kW(전압: 15 kV, 교류전류: 1 A)까지 공급되며 가변 가능하다.

플라즈마-덤프 연소기의 제어 및 모니터링은 Labview (National Instrument-SCXI 1001)를 이용하여 온도측정과 유량 제어 그리고 각각의 작동 상태에 대해 모니터링 하였다. 온도측정은 열전대(K-type)를 이용하였으며, 톨루엔과 메탄의

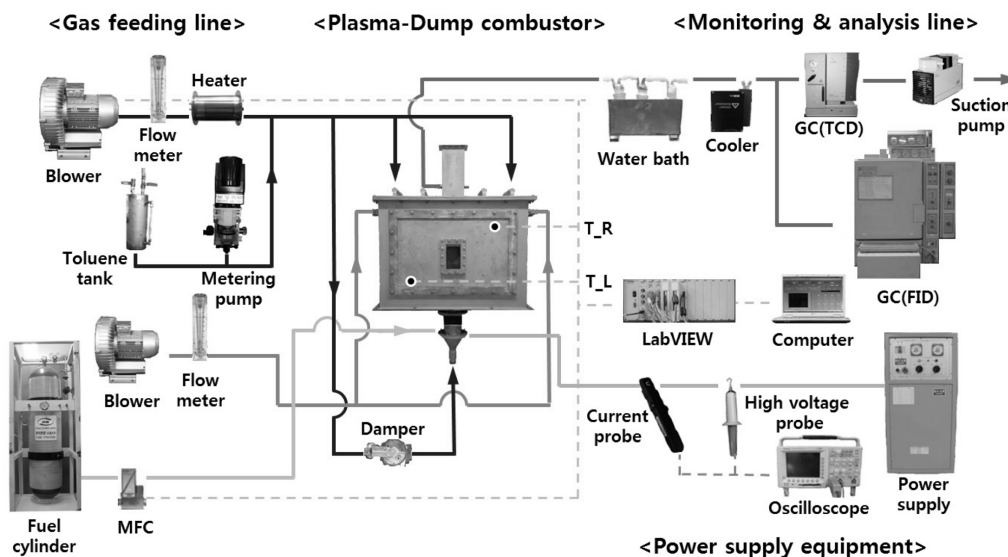


Fig. 1. Schematics of a plasma-dump combustor test.

유량은 MFC (Model : M3030 V, Linetech)를 이용하여 공급하였다. 공기에열기와 송풍기는 릴레이 전원을 이용하여 특정조건에서 스위치가 작동하도록 하였다.

## 2.2. 실험방법

플라즈마-덤프 연소기에 대한 VOC 분해특성과 에너지 효율을 파악하기 위해 VOC 공급량, VOC 농도, VOC 주입위치, 축열 차폐기(heat recuperator) 영향에 대한 변수별 실험을 수행하였다. 각각의 변수에 대한 실험조건 및 기준조건은 다음 Table 1과 같다.

상기에 언급된 변수의 실험결과를 규명하기 위해 연소 배출가스를 샘플링하고 분석하였다. 연소가스 샘플링은 플라즈마-덤프 연소기 배출구에 설치된 샘플링 포트(sampling port)에 샘플러(sampler)를 설치하여 유리섬유(glass wool)와 냉각기(cooler)에 의해 검댕(soot)과 수분이 제거된 상태의 가스를 샘플링 하였다.

배기가스 분석은 샘플링 포트에 온라인으로 연결된 두 대의 Micro-GC (CP-4900, Varian, Netherland)와 FID-GC (14B, Shimadzu, Japan)를 사용하였다. Micro-GC TCD는 A컬럼(Molsieve 5 A)으로 CO, O<sub>2</sub>를 측정하고, B컬럼(PoraPLOT Q.)으로 CO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>을 측정하였다. 톨루엔 분석은 GC-FID를 이용하였으며, 분석 조건은 오븐 40°C (4 min)~120°C (10°C/

Table 1. Experimental parameter for the plasma-dump combustor test

Parameters	Test conditions	Reference condition
VOC injection flow rate (L/min)	450 ~ 800	450
VOC concentrations (ppm)	3000, 6000, 10000	3000
VOC injection position	Inner injection / Outer injection	Outer injection
Heat recuperator	Used / Unused	Used

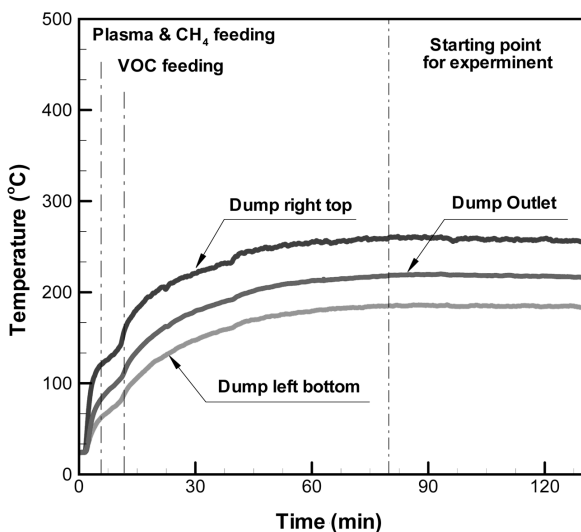


Fig. 2. Initial operating conditions showing by each temperature.

min), 인젝터 200°C, 디텍터 250°C로 설정하여 분석하였다.

Fig. 2는 플라즈마-덤프 연소기의 초기시동 및 안정화를 위한 운전조건에 대한 온도 그래프이다. 초기시동을 위해 연소용 공기를 주입하며 플라즈마 전력을 공급한 후 방전이 일어난 상태에서 보조연료인 메탄을 기준조건에 맞게 공급되었다. 그 후 모사 VOC 공급을 위해 설정된 양으로 공기를 조절하여 공급하고 배관 내에 공기히터를 거쳐 온도를 170°C로 예열시킨 후, 액체 이송펌프를 이용하여 대체 VOC인 톨루엔을 농도에 맞추어 관내로 공급한다. 이와 같은 과정을 통해 고온의 공기와 증발 혼합되어 연소기의 VOC 인젝터로 공급되었다. 그래프에서 나타난 바와 같이 일정시간이 지나 안정화 상태가 유지되면 변수의 조건에 맞추어 실험을 진행하였다.

## 2.3. 실험 데이터 해석

플라즈마-덤프 연소기의 성능해석을 위해 다음과 같이 VOC 분해효율과 에너지 효율을 다음과 같이 정의하였다.

VOC 분해효율(VOC Decomposition Efficiency, VDE)은 다음 식 (1)과 같다.

$$VDE (\%) = \frac{Tvoc_{inlet} - Tvoc_{exhaust}}{Tvoc_{inlet}} \quad (1)$$

여기서,  $Tvoc_{inlet}$ 는 대체 VOC인 톨루엔의 주입농도이고  $Tvoc_{outlet}$  톨루엔의 배출농도이다.

에너지 효율(Energy Efficiency)은 다음 식 (2)와 같이 계산된다.

$$EE (g/kWh) = \frac{Tvoc_{DR} \times GFR}{IEP + [CH_4_{HV} \times CH_4_{FR}]} \quad (2)$$

여기서,  $Tvoc_{DR}$ 은 톨루엔 분해율, GFR은 주입가스의 유량, IEP는 공급전력,  $CH_4_{HV}$ 은 메탄 발열량,  $CH_4_{FR}$ 은 메탄 공급량이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. VOC 공급유량 변화특성

플라즈마-덤프 연소기의 유량변화에 대한 VOC 분해특성을 규명하기 위해 덤프 하단에 설치되어 있는 보조 플라즈마 버너로 공급되는 보조연료인 메탄과 공기의 공급이 고정된 상태에서 덤프 양쪽 상부에 위치한 인젝터로 공급되는 모사 VOC의 유량을 변화시켜 가면서 실험이 수행되었다. 모사 VOC는 공기와 톨루엔이 희석 혼합된 것으로 톨루엔 농도가 3,000 ppm이다.

VOC 분해효율은 본 실험의 조건범위 내에서 모사 VOC 공급유량이 증가됨에 따라 최대 분해율 89.64%에서 83.35%로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 공급되는 유량이 증가

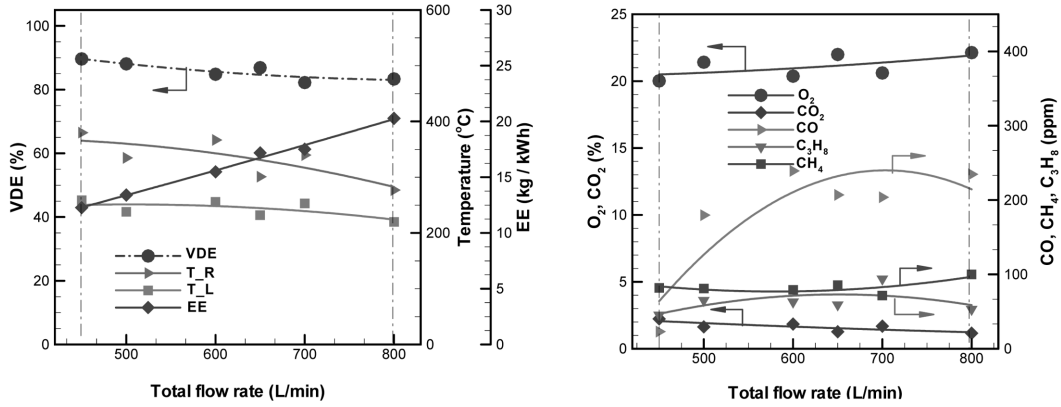


Fig. 3. Effect on the amount of total gas feed.

함에 따라 가스유속이 증가하게 되며 이로 인해 덤프 재순환이 이루어지는 캐비티 영역에서의 VOC 분해처리 시간이 짧아지기 때문이다. 또한, 주입되는 유량에 따라 연소기 내부의 온도가 차이에 의해 톨루엔 분해율에도 영향을 미치는데, 이를 측정하기 위하여 연소기 내부에 열전대를 오른쪽 상단과 왼쪽 하단에 설치를 하였다. 이를 Fig. 3에서 T\_R (Temperature\_Right), T\_L (Temperature\_Left)로 표시하였다. 온도의 변화는 주입유량이 증가할수록 그래프에서 볼 수 있듯이 덤프 캐비티 영역내의 온도가 감소되는데 이 역시 VOC 분해반응이 낮아지는 요인이기도 하다. 반면 에너지 효율은 공급 가스유량의 증가에 따라 12.27 kg/kWh에서 20.28 kg/kWh까지 증가되는데, 이는 식 (2)의 정의에서 VOC 분해율의 저감 효과보다 상대적으로 가스 공급량 증가의 영향이 크기 때문이다.

출구에서 샘플링 된 대표 잔류가스의 대부분은 주입유량의 증가에 크게 변화가 없지만 일산화탄소의 경우 점차적으로 증가된다. 이는 보조버너로 공급된 메탄이 플라즈마 버너에서 연소과정을 거치면서 미연된 일산화탄소와 모사 VOC의 분해에 의해 생성된 일산화탄소가 플라즈마 버너 후단부와 덤프 캐비티 영역에서 이산화탄소로 전환하기 위한 충분한 반응 체류시간을 확보하지 못하기 때문이다.

### 3.2. VOC 농도변화특성

모사 VOC의 농도변화에 대한 영향을 파악하기 위해 톨

루엔의 농도를 각각 3,000 ppm, 6,000 ppm, 10,000 ppm로 변화시킨 경우에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 4의 결과에서 모사 VOC의 농도가 증가되어도 VOC 분해효율과 에너지 효율은 3,000 ppm에서는 12.44 kg/kWh, 6,000 ppm에서는 12.3 kg/kWh, 10,000 ppm에서는 12.73 kg/kWh로 거의 변화가 없게 측정되었다. 모사 VOC인 톨루엔의 농도가 증가하여 처리량이 증가하여도 분해율의 변화가 없는 것은 가연성 톨루엔의 양이 증가함에 따라 덤프 캐비티 내의 연소가 증진되고 아울러 내부의 온도가 상승하여 톨루엔의 분해가 증대되기 때문이다. 결과적으로 가연성 VOC의 증가는 처리량의 증가로 분해가 어려운 조건이기도 하지만 증가된 가연성분 자체가 보조연료 역할을 하여 VOC의 분해가 이루어지는 캐비티 내 온도가 증가되고, 분해율이 높아지게 되어 두 요소는 트레이드오프(trade-off)를 이루어 분해효율이 거의 변화가 없다. 에너지효율 역시 VOC 공급유량과 전력의 변화 없이 상기에 언급된 VOC 분해율이 거의 일정하므로 이와 연동되어 큰 변화가 없다. 따라서 본 연구에서 제안된 플라즈마-덤프 연소기는 VOC 농도가 높은 경우에도 그 처리가 효과적이라는 것을 알 수 있다.

VOC의 농도가 증가함에 따라 톨루엔의 분해에 의한 중간생성물인 탄화수소가 증가되지만, 이미 언급된 바와 같이 덤프 캐비티 내의 온도가 증가되어 충분한 공기가 공급되어진 상태에서 연소가 잘 진행되기 때문에 이들 성분은

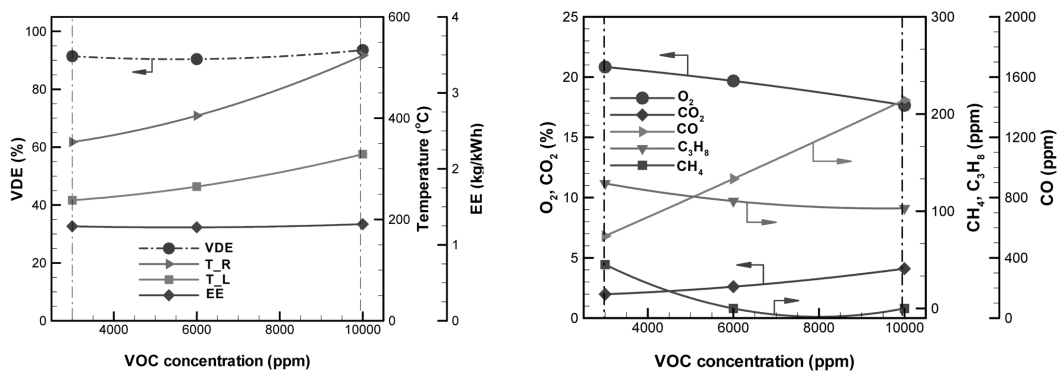


Fig. 4. Effect on the VOC concentration.

감소됨과 아울러 이산화탄소가 증가된다. 그러나 일산화탄소의 경우는 완전연소를 위해서는 온도보다 산소와의 물리적 혼합이 중요하므로 톨루엔의 농도가 증가됨에 따라 중간생성물로 생성된 일산화탄소가 이산화탄소로 전환되지 못하여 다소 증가되는 것을 알 수 있다.

### 3.3. VOC 주입위치변화 특성

본 연구에서 새로이 제안된 플라즈마-덤프 연소기의 특성 중 하나는 기존의 연소기와 달리 덤프 캐비티 영역이 존재하여 VOC 분해 체류시간을 확보 한다는 것이다. 이는 덤프 연소기 상단 양측에 설치된 VOC 인젝터 주입위치에 따라 덤프 캐비티 내부 재순환 유동패턴이 달라진다. 이에 대한 유동특성을 파악하기 위해 상용 CFD 프로그램인 Phoenics Code (Ver. 3.5.1)를 사용하여 유동장을 계산하였으며, 기준 조건에서의 결과는 Fig. 5와 같다.<sup>4)</sup>

VOC 주입구가 바깥쪽에 위치 할 경우 덤프 양쪽 캐비티 영역 전체에 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 인젝터로 주입되는 VOC는 출구로 배출되기 전 캐비티 재순환영역에 충분한 체류시간을 확보 할 수 있다. 그러나 플라즈마 버너로부터 유입되는 연소가스는 3D 매트릭스 버너 선단에 위치한 배플(baffle)이 기공도 0.7을 가지고 있어 큰 저항 없이 바로 통과되고 있는 것을 알 수 있다. 반면, VOC 주입구의 위치가 안쪽에 위치할 경우 캐비티 영역의 재순환 유동이 양분화되어 상부와 하부로 나뉘어 존재한다. 이 경우 VOC 주입구에서 주입되는 VOC는 상부 캐비티에서 체류하고, 플라즈마 버너에서 생성되는 연소가스는 하부 캐비티 재순환 영역에서 체류하게 된다. 결과적으로 VOC 인젝터로 공급되는 VOC는 바깥쪽 주입보다 상대적으로 체류시간 확보가 어려우나 플라즈마 버너에서 생성된 미연 배기가스는 하부 재순환영역이 생성되어 충분한 체류시간을 가질 수 있다.

Fig. 6은 VOC 주입구 위치 변화에 따른 VOC 분해효율과 에너지 효율 그리고 대표 배출가스의 농도를 나타낸 것이다.

VOC 주입구가 바깥쪽인 경우 분해율은 90.97%, 에너지 효율은 12.38 kg/kWh이고, 안쪽의 경우는 분해율은 88.19%, 에너지효율은 12 kg/kWh이다. 주입구의 위치가 바깥쪽인

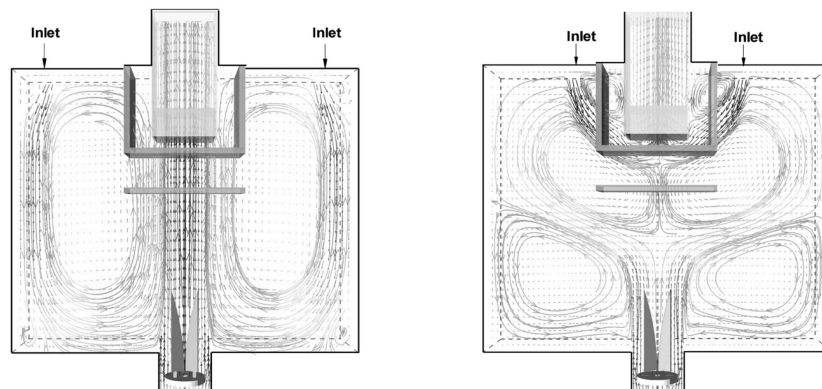


Fig. 5. Result of CFD calculation for each VOC injection position.

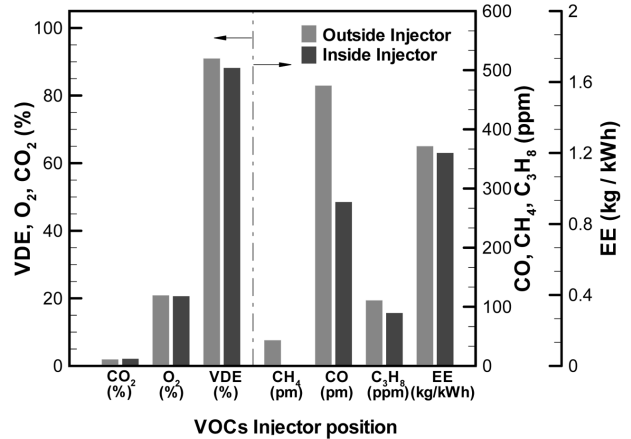


Fig. 6. Effect on the different cases of VOC injection position.

경우가 분해율과 에너지 효율이 다소 높은 결과를 얻었다. 이는 상기 CFD 계산에 의한 유체유동에서 언급된 바와 같이 바깥쪽 인젝터로 공급되는 VOC의 경우가 캐비티 재순환 영역에서 상대적으로 오래 체류하기 때문에 톨루엔이 분해될 기회가 더 많이 확보되기 때문이다.

그러나 대표 연소배기가스는 VOC가 바깥쪽 주입 보다 안쪽에 주입하는 경우가 200 ppm 정도 적게 배출되며, 플라즈마 버너에 주입되는 메탄과 미연성분인 일산화탄소가 그 경향이 크다. 이는 VOC가 안쪽 인젝터로 주입되는 경우에는 바깥쪽으로 주입될 때 생성되지 않은 하부 재순환영역이 존재하여 플라즈마버너에서 미연되거나 분해된 가스가 바로 배플을 통과하여 출구로 나가지 않고 이들 가스가 완전 연소 또는 전환하는 시간의 확보가 가능하기 때문이다.

### 3.4. 축열 차폐기 영향

배기 폐열의 회수를 위해 세라믹 재질로 되어 있는 허니컴 형태의 축열 차폐기를 3D 매트릭스 연소기 출구에 설치되어 있는 경우와 없는 경우에 대해 플라즈마-덤프 연소기 성능을 확인하였다.

VOC 분해 효율과 에너지 효율은 예측된 바와 같이 축열 차폐기가 설치된 경우가 더 높다. 분해율은 차폐기를 사용할 경우 89.64%이고, 차폐기를 사용하지 않을 경우 분해율

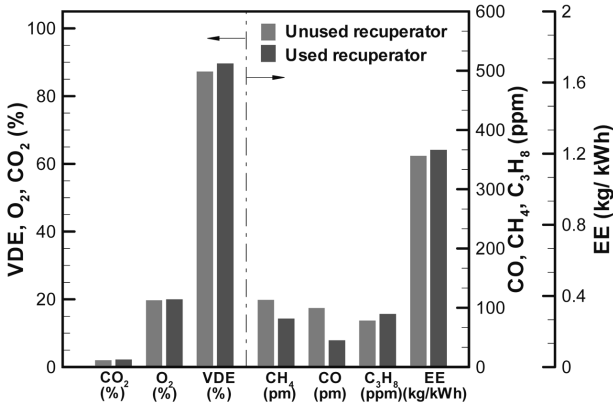


Fig. 7. Effect of the heat recuperator.

이 87.32%로 다소 낮아지는 결과를 얻었다. 또한 배기되는 가스 중 미연성분도 역시 연소분해가 더 잘 되어 적은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

따라서 VOC 저감을 위해 제안된 플라즈마-덤프 연소기 특성상 분해효율을 만족하는 범위 내에서 최대한 연소기의 온도가 낮은 상태로 운전되고 부하변동에 분해가 잘 유지되어야 하는 특성상 축열 복사 차폐기를 설치하는 것이 효과적이다.

위의 변수를 통해 VOC 제거를 위한 플라즈마-덤프 연소기의 분해 특성을 살펴보았다. 플라즈마-덤프연소기의 성능을 알아보기 위하여 다른 연소기와 제거율을 비교 하였다. 플라즈마 덤프 연소기는 비교적 낮은 온도에서 오랜 체류 시간으로 VOC를 분해하는 특징을 가지고 있다. 이와 비교하여 축매연소의 경우 플라즈마-덤프와 비슷한 온도에서 VOC를 분해하는데, 평균 제거 효율은 78.92%로 조사되었다.<sup>8)</sup> 또한 플라즈마 기술만으로 VOC를 제거할 경우 저온 플라즈마를 이용한 VOC 제거율은 평균 74% 정도로 조사되었다.<sup>9)</sup> 이를 바탕으로 플라즈마 덤프 연소기는 다른 VOC 처리 방식에 비해 제거율이 높음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

흡착 농축용 VOC 처리를 위해 플라즈마-덤프 연소기를 새로이 제안하여 주요 영향변수에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

VOC 공급유량이 증가됨에 따라 VOC 분해효율은 89.64%에서 83.35%로 다소 감소되고 에너지 효율은 12.27 kg/kWh에서 20.28 kg/kWh로 증가되었다.

VOC의 농도 변화에 대한 변수는 농도가 3,000 ppm에서 10,000 ppm까지 증가함에 따라 분해효율은 91.42%에서 93.54%, 에너지효율은 12.44 kg/kWh에서 12.73 kg/kWh로 거의 변화가 없었다.

VOC 주입위치는 덤프 캐비티 유동에 큰 영향을 주어 배기가스의 농도에도 영향을 나타내었다. 플라즈마 버너로 공급되는 보조연료의 완전연소를 위해서는 안쪽에서 VOC가

주입되는 것이 더 효과적인 상황이었다. 하지만 본 실험에서는 바깥쪽에서 공급되는 것이 VOC 분해율과 에너지 효율 모두 높게 측정되어 바깥쪽이 본래의 VOC 연소기 목적에는 적합한 조건인 것을 알 수 있었다.

축열 차폐기의 경우는 설치되는 경우가 분해효율이나 에너지 절감 측면에서 유리하였다.

상기의 변수별 성능실험 결과를 통해 본 연구에서 개발된 플라즈마-덤프 연소기의 경우 VOC의 유량과 농도변화에도 효과적으로 대기오염기준을 만족시키면서 에너지 비용이 절감된 상태에서 VOC를 효과적으로 처리될 것이라 판단된다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2013년도 정부(중소기업청)의 재원으로 중소기업융합지원센터의 지원을 받아 수행된 중소기업융합기술개발사업(No. S2148261)의 결과임.

KSEE

#### References

- Lim, C. S., "Ozone forming potential by VOCs exhausted from motor vehicles," Konkuk University doctorate thesis (2002).
- Kim, J. C., "Trends and Control Technologies of Volatile Organic Compound," *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **22**(6), 743~757(2006).
- Joung, J. K., "Decomposition of volatile organic compounds (VOCs) using synergistic combination system of non-thermal plasma (NTP) and catalyst," Korea University doctorate thesis (2012).
- Yang, D. R., Azhari, C. H., Mohtar, W. H. W. and Lee, H., "Advanced VOCs decomposition method by gliding arc plasma" *Chem. Eng. J.*, **131**(1-3), 337~341(2007).
- Kim, S. C. and Chun, Y. N., "Decomposition Characteristic of Toluene Using a Glidarc Water-jet Plasma," *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **24**(3), 329~335(2008).
- Chun, Y. N., Chae, J. S. and Jung, O. J., "The Development of Hazardous Waste Compact Dump incinerator for Low Emissions," *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **16**(6), 653~663 (2000).
- Lim, M. S. and Chun, Y. N., "The Study of Model Biogas Catalyst Reforming Using 3D IR Matrix Burner," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(12), 840~846(2012).
- Lee, K. J., "The study of catalytic combustion of VOCs," *J. Korea Org. Resour. Recycling Assoc.*, **14**(1), 169~177(2006).
- Kim, H. G., Beak, T. I. and Park, N. S., "The plasma system for removal of VOCs/odor," *J. Odor and Indoor Environ.*, **2005**(6), 177~179(2005).