

## 축방향 2단 다공체 내 N<sub>2</sub>로 과다 희석된 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> 화염의 안정화에 관한 실험적 연구

김승곤\* · 이대근\*\* · 노동순\* · 고창복\*

### Experimental Investigation on the Highly N<sub>2</sub>-diluted CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> Flame Stabilization in an Axially Two-section Porous Medium

Seung Gon Kim\*, Dae Keun Lee\*\*, Dong-Soon Noh\*, Chang-Bog Ko\*

#### ABSTRACT

Stabilization characteristics of highly N<sub>2</sub>-diluted CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> flame in an axially two-section porous inert medium were experimentally investigated for its application to the waste gas scrubber in semiconductor manufacturing processes. The flame behaviors were observed with respect to the fuel and N<sub>2</sub> flow rates and the equivalence ratios. As a result, four kinds of flame behaviors such as stable, flashback crossing the interface, blowout and sudden extinction were observed. It was also found that there exists two flame regime divided by a critical fuel flow rate. In addition, the flame stability was discussed based on the N<sub>2</sub> index which means the abatement capacity of our combustor in scrubbing the waste gas from the semiconductor processes.

**Key Words** : Combustion in porous inert medium, Flame stabilization, Two-section porous medium, Excess enthalpy combustion, Waste gas scrubber in semiconductor manufacturing processes

주요 에너지 다소비 산업 중 하나인 반도체 산업에는 제품의 생산 및 세정 공정에서 지구온난화를 유발하는 PFC(perfluorocarbon) 계열의 다양한 가스가 사용된다[1]. 공정 후 배출되는 이들의 폐가스는 N<sub>2</sub>에 매우 낮은 농도로 섞여서 배출되는데, 그들의 처리 방법 중 하나가 LNG를 이용한 연소처리법이며 그 설비를 Burn & Wet 스크러버(이하 스크러버)라 한다.

종래의 스크러버에서 사용되는 연소기는 일반적인 노즐타입의 연소기가 대부분이다. 여러 종류의 PFC 처리 가스들 중 난분해성인 CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub> 등을 태워 분해하기 위해 일반적으로 고온의 산소 화염을 사용하며 연소기의 안전을 위해 노즐에서 화염을 부상시키는 형태로 연소기를 고안한다. 이 때 제트 부상 화염은 처리가스의 유량이 증가함에 따라 처리 효율(destruction rate of efficiency, DRE) 감소 및 화염 날림과 같은 연소 불안정성을 유발시켜 시스템의 안정성을 위협하는 요인이 된다. 근래에는 반도체 및 디스플레이의 고집적화 및 대형화로 인해 단위 설비 당 폐가스의 배출량이 점차 증가하는 추세이며, 이를 안정적으로 처리함과 동시에 에너지 이용 효

율 측면 및 점차 심화되는 환경물질 배출규제(NO<sub>x</sub> 총량제 등)에 효과적으로 대응할 수 있는 새로운 연소기술의 개발이 시급한 실정이다.

처리효율 향상 및 에너지 이용 효율화, 청정화 및 설비 대형화에 대응할 수 있는 연소기술로서의 공통 분모는 고온 배기열의 회수 및 이용에 있는 것으로 판단된다. 더 나아가 배기열의 재순환(예혼합기 및 처리가스의 예열)을 통한 초과엔탈피 연소(excess enthalpy combustion)[2]를 구현한다면 난분해성 가스의 처리 효율 및 용량을 획기적으로 증가시킬 수 있을 것이다. 이러한 측면에서 다공체 연소(porous media combustion, 이하 PMC) 기법은 다공체를 매개로 발생하는 내부 열 재순환을 통해 초과엔탈피연소를 매우 간단한 구조로 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 매우 희박한 조건의 혼합기를 연소시킬 수 있어 전자산업에 사용되는 폐가스를 안정적으로 처리하기 위한 새로운 연소기법이라고 판단된다.

본 연구에서는 전자산업에서 배출되는 PFC계 폐가스의 처리에 적용하기 위한 PMC 기법을 고안하고, 처리 용량에 따른 화염 안정화 특성을 도출하기 위해 N<sub>2</sub>로 과다 희석된 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>화염의 거동을 관찰하였다. 연료량과 당량비 및 N<sub>2</sub> 유량에 따라 화염 안정화 선도를 도출하였고 화염은

\* 한국에너지기술연구원

† 연락처, dklee@kier.re.kr

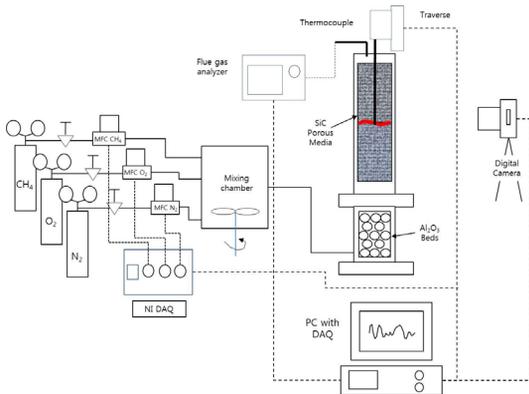


Fig. 1 Experimental setup

도와 배기가스의 조성을 측정하였다.

Fig. 1은 실험장치 개략도이다. 기본 다공체는 발포 성형된 SiC Form 형태이나, 화염 안정성을 향상시키기 위해 서로 다른 기공률 및 기공 크기를 갖는 두 개의 SiC 폼을 축 방향으로 적층한 형태(two-section porous medium)의 다공체를 사용하였다[3-4]. 두 종류의 SiC form은 모두 외경이 27 mm이고 길이는 40 mm이다. 화염의 거동을 가시적으로 관찰하기 위해 두 다공체는 내경 27 mm, 두께 1.5 mm의 투명 석영관 내부에 삽입, 적층하였다. 화염의 거동은 SiC foam의 적열 위치로부터 간접적으로 확인하였고, 디지털 카메라를 이용하여 10초 간격으로 180초 간 촬영하여 그 안정화 위치를 정량화 하였다. 연료와 산화제로는 CH<sub>4</sub>(99.95%)와 순수 O<sub>2</sub>(99.95%)를 사용하였으며 처리가스는 그것의 대부분을 차지하는 N<sub>2</sub>로 모사하였다. 이들을 모두 충분히 예혼합한 후에 연소기로 공급하였다.

2단 SiC 다공체 연소기 내에서의 화염 안정화 특성은 Fig. 2와 같다. 연료 희박 조건인 당량비 0.8, 0.6, 및 0.4에 대해 연료량과의 N<sub>2</sub> 유량을 변화시키면서 화염의 거동을 관찰하였다. 여기서 N<sub>2</sub> index는 N<sub>2</sub> 유량을 연료 유량으로 나눈 값으로서 스크리빙의 처리용량을 의미하는 지표라고 할 수 있다. 실험적으로 도출된 화염 안정화 선도를 통해 연료량과 N<sub>2</sub> index 변화에 따라 크게 네 가지 화염 거동이 관찰되었다. 첫 번째는 두 다공체의 경계에 화염이 안정화되는 화염 안정(stable) 영역이며, 두 번째는 경계를 가로질러 상류로 전파하는 역화(flashback) 영역, 세 번째는 하류로 서서히 전파하는 blowout 영역, 그리고 마지막은 화염의 순간적인 소화(extinction) 영역이다. 그럼에 도시된 바와 같이 연료 유량이 충분할 경우에는 N<sub>2</sub> 유량이 증가하거나 감소할 때 각각 blowout 또는 flashback이 발생하지만, 충분치 못할 경우 N<sub>2</sub> 유량의 증감에 관계없이 공통적으로 화염 소화가 발생하였다. 이를 통해 화염 안정화에 관한 두 가지 regime과 이를 결

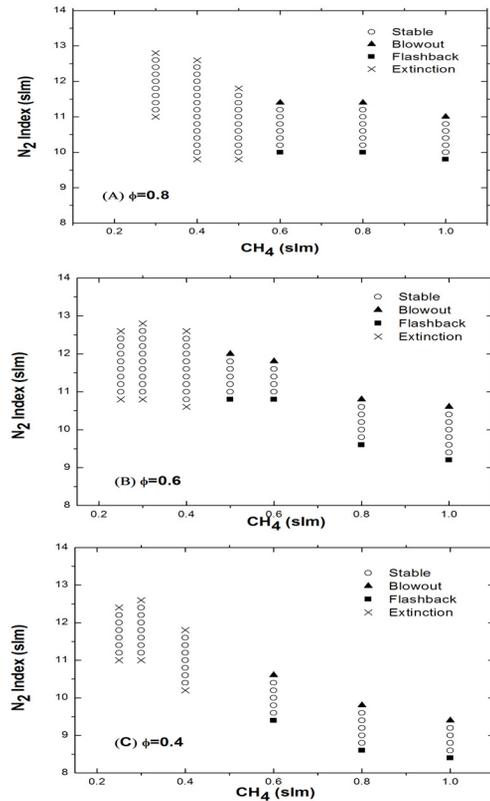


Fig. 2. Flame stabilization characteristics

정짓는 연료의 임계 유량이 존재함을 알 수 있다. 또한 첫 번째 regime의 경우 화염 안정 영역은 연료 유량이나 당량비에 관계없이 거의 일정한 범위를 가지나, 두 번째 regime의 경우 영향을 받으며 더 넓은 안정 영역을 갖는다. 또한 당량비가 증가함에 따라 안정 영역은 더 큰 N<sub>2</sub> index 값을 갖는다. 실험 조건 하에서 연료 유량에 따른 화염 안정 영역의 N<sub>2</sub> index는 최소 9에서 최대 약 13에 달하는 것으로 확인 되었다.

### 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 기관고유사업의 일환으로 수행되었습니다(B3-2461-04).

### 참고 문헌

[1] M. B. Chang and J. S. Chang, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 4101  
 [2] Weinberg, F. J., *Combust. Sci. Technol.*, 121(1996) 3 - 22.  
 [3] P.-F. Hsu, W.D. Evans, J.R. Howell, *Combust. Sci. Tech.* 90 (1993) 149-172.  
 [4] B.J. Vogel, J.L. Ellzey, *Combust. Sci. Tech.* 177 (2005), 1323-1338.