

핀 튜브를 이용한 촉매 열 교환기의 연소특성

유상필*, 서용석*, 조성준*, 강성규*

THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF THE CATALYTIC HEAT EXCHANGER WITH FIN TUBES

Sang-Phil Yu*, Yong-Seog Seo*, Sung-June Cho* , Sung-Kyu Kang*

Key Words : Catalytic Heat Exchanger, Conversion, Catalytic Fin, Pd Catalyst, Numerical Simulation.

Abstract

The catalytic heat exchanger, which integrates two functions of heat generation and heat exchange into one equipment, was designed and its characteristics were investigated by the experiment and numerical simulation. The surface of the fin tube was deposited with Pd catalyst. The conversion of the mixture in the catalytic heat exchanger was more significantly affected by the inlet velocity of the mixture than by the inlet temperature and equivalence ratio of the mixture. It was found that the catalytic surface area of the fin tubes should be sufficiently increased to make the combustion intensity of the catalytic heat exchanger as high as possible. Results showed that the fin tubes, placed in the triangularly staggered form, should be adjusted so that the mixture flows uniformly over all the catalytic fin surfaces. Numerical simulation results demonstrated that the flow pattern of the mixture significantly affected the conversion of the mixture.

1. 서 론

촉매 연소는 촉매 표면에서 연료와 산소가 반응하는 현상이다. 촉매 연소의 초기 적용 단계에서는 대개 작은 크기의 히터에 쓰였다. 자동차의 촉매 정화기는 촉매 연소가 사용된 대표적인 예이다. 근래에 들어서는 많은 촉

매 연소 연구자들의 관심의 초점이 저 NOx 연소기 개발에 맞춰 지고 있다. [1,2]

촉매 연소는 일반 화염 연소와 비교할 때 몇 가지 특징을 가지고 있다. 첫째, 촉매 연소는 화염 연소에 비해 희박 연소 조건을 갖고 있다. 가스 연소에 의해서는 연소시킬 수 없는 희박한 혼합기도 촉매 연소를 통해 연소시킬 수 있다. 혼합기의 단열 화염 온도는 혼합기의 연료가 희박해질수

* 한국에너지기술연구소, 대전시 유성구 장동 71-2, 305-343

록 하강한다. 따라서, 촉매 연소를 연소 시스템에 적용한다면, NO_x 생성을 충분히 억제할 수 있는 저온에서 연소를 유지하는 것이 가능해진다.[3] 둘째, 촉매 연소의 점화 온도가 가스 연소의 점화 온도보다 낮다. 왜냐하면 촉매 표면 반응의 활성화 에너지가 가스 반응보다 훨씬 낮기 때문이다. 즉, CH₄의 점화 온도는 가스 연소의 경우 615°C 이지만, Pd 촉매에서의 촉매 연소시 400°C의 값을 갖는다. 이러한 촉매 연소의 장점들을 이용하여, 많은 응용분야에 대해 적용되기 위한 촉매 연소기의 개발이 활발히 진행되고 있다.[4,5]

본 연구의 목적은 Pd 촉매가 담지된 촉매 핀을 이용한 촉매 열 교환기를 개발하는데 있다. 기존의 촉매 열 교환기는 연료전지 Stack 으로부터 미사용된 수소화합물을 효과적으로 회수하는데 쓰이기 위한 목적으로 개발되어왔다.[6] 반면에 본 촉매 열 교환기는 LNG, LPG, 폐가스 등을 이용하여 산업 공정에 열기나 열수를 공급하기 위한 목적을 가지고 있다.

본 연구의 촉매 열 교환기는 열 발생과 열 교환의 두 가지 기능을 하나의 장치로 통합하였다. 촉매가 담지된 핀 튜브는 열 발생과 열 교환의 두 가지 기능을 동시에 수행한다. 연료와 공기의 혼합기가 촉매가 담지된 핀의 표면에서 반응을 일으킨 후, 발생된 열은 핀 튜브 내의 열매 - 공기나 물 - 로 전달된다. 따라서, 촉매 열 교환기는 열 발생을 위한 보일러 장치가 필요하지 않으며, 이로 인해 열 발생 장치의 설치비용이 발생하지 않는다. 또한 촉매 연소가 NO_x를 거의 발생시키지 않는 장점으로 인해, 저공해 열 발생 시스템의 구현이 가능할 것으로 기대된다.

이러한 촉매 열 교환기의 장점들도 불구하고, 촉매 열 교환기의 개발

에는 촉매의 특성상 갖는 제약 조건들에 의해 몇몇 어려움이 있다. 예를 들면, 촉매 열 교환기는 촉매 핀 튜브의 온도를 특정 범위 내 - 표면 반응의 점화 온도 이상, 그리고 쓰여지고 있는 촉매의 열적 내구 온도 이하의 온도 범위 - 로 유지해야 한다.

촉매 열 교환기에 대한 데이터가 충분히 축적되지 않았기 때문에, 우선 촉매 열 교환기의 연소 특성을 분석하는 것이 필요하다. 실험과 수치해석을 통해 촉매 열 교환기의 촉매 연소 특성을 분석하였다. 이를 위해, Pd 촉매가 담지된 촉매 핀 튜브로 이루어진 촉매 열 교환기를 설계, 제작, 실험하였다.

2. 실험

2.1 촉매 핀 튜브

핀은 대개 열 교환기에서 열 전달률을 증가시키기 위해서 사용되어진다. 본 연구에서는, 핀은 두 가지 목적으로 사용되어진다. 하나는 촉매 반응을 증가시키기 위한 표면적의 확보를 위해서이고, 또 하나는 열 전달률을 증가시키기 위해서이다. 본 연구에 쓰여진 핀 튜브는 그림 1.에 나타내었다. 핀의 표면적이 넓어질수록, 촉매 반응이 활발해진다. 따라서, 핀의 개수를 늘리고 핀의 높이를 높임으로써 핀 튜브의 표면적을 최대한 넓게 확보하려고 노력했다. 촉매 핀 튜브의 소재는 고 내열성과 Pd 촉매가 담지되어질 수 있는 조건을 가져야 한다. SUH 409 (11% Cr, 1.0% Ti, 0.06% C, Fe balance) 가 촉매 핀의 소재로 선택되었다.

촉매 핀 튜브를 만들기 위해서, 핀 튜브에 TiO₂ 졸을 Washcoating 한 후, Pd 수용액(19.96% Pd, Engelhard)을 표면에 함침시킨다. 그 후, 100°C에서 12시간 동안 건조시킨 후, 550°C에서 6시간 동

안 소성시켰다. 촉매 핀 튜브의 표면에 함침되어진 Pd의 함량은 약 1wt.%였다.

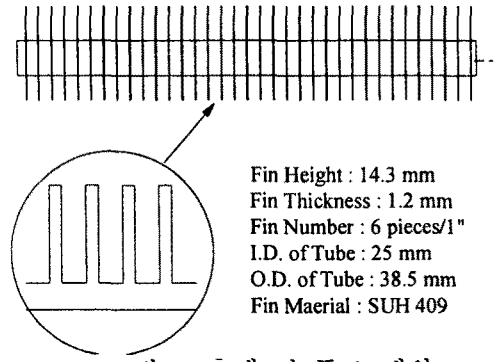


그림 1. 촉매 핀 튜브 제원

2.1.1 실험장치

그림 2는 촉매 열 교환기의 전체적인 개략도이다. 혼합기 공기는 압축기로부터 공급되며, MFC를 통해서 제어된다. 공기는 예열 온도까지 전기저항으로 가열되어진다. LNG(CH_4 90.22%, C_2H_6 6.45%, C_3H_8 2.34%, C_4H_{10} 0.99%)는 MFC를 통해서 제어되어진다. 촉매 핀 튜브로부터 발생된 열은 Blower에 의해 공급되어지는 공기에 전달되어진다. 튜브 내의 공기는 오리피스 유량계로 제어된다.

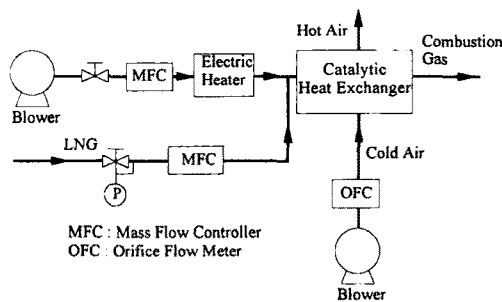
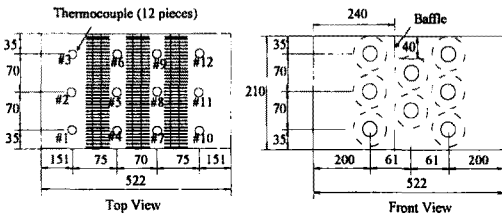
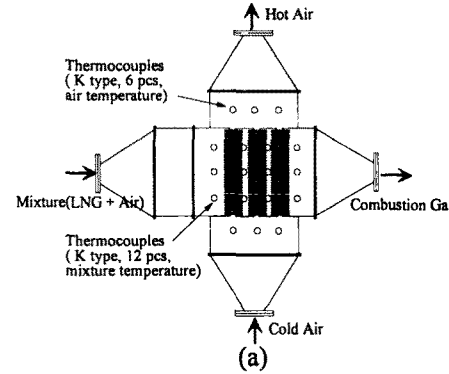


그림 2. 실험 장치 개략도

그림 3은 촉매 열 교환기의 자세한 모습을 나타내었다. 촉매 열 교환기는 일곱 개의 촉매 핀 튜브로 이루어져 있다. 촉매 핀 튜브들은 혼합기의 유동 방향

을 따라 삼각배열을 이루고 있다. 촉매 핀 주변의 유동을 균일하게 하게 만들려는 목적으로 배플(baffle)을 촉매 열 교환기 내에 설치하였다.



(b)

그림 3. (a) Pd가 담지된 촉매 핀 튜브로 이루어진 촉매 열 교환기 (b) 촉매 핀 튜브들의 배열.

혼합기의 온도는 그림 3.(b)에 표시되어 있는 위치에서 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 튜브의 내를 흐르는 공기의 온도도 역시 K-type 열전대를 통해 측정되었다. 촉매 열 교환기의 배출 연소 가스를 분석하기 위해서, 배출 연소 가스는 촉매 열 교환기의 출구에서 수집되었다. 수집된 가스들의 성분은 실시간으로 분석되었다. NDIR 분석기(HORIBA, VIA 510)를 통해 CO_2 와 CO 농도를 측정되었다. FID 분석기(HORIBA, FIA 510)을 이용, THC를 분석하였다. 수집 가스의 수분은 분석 전 Sample Conditioner를 통해서 제거되었다.

3. 수치계산

3.1 수학적 모델

촉매 열 교환기의 계산 영역은 그림 4.에 점선으로 둘러싸인 부분으로 나타내었다. 그림에서 튜브의 피치를 따라, x 는 주유동 방향 좌표, y 는 주유동 수직 방향 좌표이고, z 는 핀 피치 방향의 좌표이다. 계산을 쉽게 하기 위해서 각 핀 튜브 중 하나의 핀이 선택되었다.

계산 영역의 상류 경계에서는 균일한 유동방향 속도분포와 온도분포가 가정되었다. 입구경계에서의 y 방향과 z 방향의 속도 성분들은 0으로 가정하였다. 계산 영역의 하류경계에서, 유동장과 온도장은 x 방향에서의 모든 변수들에 대해 무 확산 Flux를 가정하였다. 핀 튜브들의 모든 표면들에 대해서, 모든 속도 성분은 0으로 가정되었으며, 촉매 표면 반응은 경계 조건으로 적용되었다. 대칭 조건은 x - y 평면에서 각각의 경계에 대해 적용하였다.

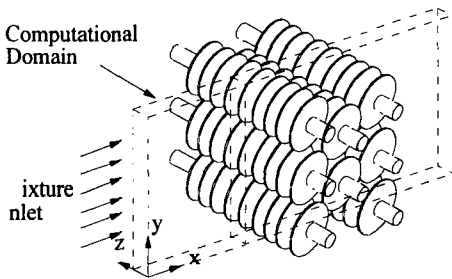


그림 4. 촉매 열 교환기의 계산영역

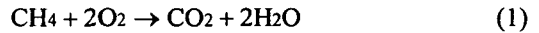
본 연구에서는 복합 격자 시스템이 쓰여졌다. 이것은 두 개의 격자- 6면체와 3각 기둥 격자-로 이루어져 있다. 6면체 격자는 핀들과 입구영역, 출구영역 부분을 이루고 있다. 3각 기둥 격자는 핀 튜브 사이의 영역에서 적용되었다. 격자 시스템은 약 65,000 개의 셀로 이루어졌다. 본 수치 계산에서 사용된 삼차원 기초 방정식은 표면반응이 있는 정

상상태, 층류에서의 연속, 모멘텀, 에너지와 Species 방정식이다. 지배 방정식을 풀기 위해서, FLUENT 소프트웨어가 사용되었다.

3.2 표면 반응의 화학적 성질

표면반응은 핀 표면의 온도가 표면 반응의 점화 온도에 이르자마자 시작된다. 촉매 핀 표면 위를 흐르는 혼합기는 촉매 핀으로부터 발생된 열에 의해 가열되어진다. 촉매 핀 표면 위를 흐르는 혼합기의 온도가 혼합기의 화염 점화 온도보다 높아지는 경우, 가스 반응이 시작된다. 이런 경우, 가스 반응과 촉매 반응이 촉매 표면 위에서 공존한다. 대부분의 혼합기가 가스 반응 이전에 표면 반응으로 태워진다면, 가스 반응에 의한 혼합기의 전환률은 무시할만하다. 따라서, 본 수치적 계산에서는 표면 반응만을 다루었다.

Pd 촉매가 담지되어 있는 촉매 표면에서의 CH_4 의 표면 반응은 다음의 식으로 나타내어진다.



Pd 촉매가 담지된 촉매 표면 위의 CH_4 의 표면 반응율은 Yao가 제시한 다음 식으로 계산하였다.[7]

$$r = A \exp(-E/RT)[CH_4]^{0.7} \quad (2)$$

여기서 r ($kg/m^2 \cdot s$)은 CH_4 의 표면 반응률이고, A 는 지수앞자리인자, E 는 활성화 에너지 (7.11×10^7 [J/kmole]), R 은 Universal Gas Constant이다. 지수앞자리인자 A 는 촉매, 촉매 핀 튜브를 준비하는 과정, 혼합기의 성분 등에 의해 바뀌는 값이다. 기존의 연구자들은 표면 반응 발화에 대한 수치적, 실험적 결과들을 비교함으로써, 지수앞자리인자를 결정했다. 본 연구에서도 Pd 촉매가 담지되어 있는 촉매 핀 튜브에 대해

실험적, 수치 계산적 혼합기 전환률을 통한 CH₄ 촉매 산화률 계산으로 지수앞 자리인자를 구하였다. A는 14.0 [kg^{0.3}·m^{0.1}/s]의 값을 갖는다.

4. 결과 및 토론

4.1 실험결과

촉매 열 교환기 내의 온도 분포와 연소 가스의 성분을 측정하였다. 촉매 열 교환기의 촉매 연소 특성을 이해하기 위해 촉매 핀과 튜브 내의 공기 사이의 열 교환 없이 실험을 수행하였다. 연소 가스의 전환률은 다음 식으로 계산되었다.

$$\text{Conversion (\%)} = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{HC}] + [\text{CO}_2]} \times 100 \quad (3)$$

촉매 열 교환기의 운전 변수는 입구 속도, 입구 온도 (예열온도), 혼합기의 당량비이다. 위 운전 변수들에 대해 촉매 열 교환기에 대한 연소 특성 분석이 수행되었다. 그림 5.는 촉매 열 교환기에 대해 입구 온도에 대한 혼합기의 전환률의 변화를 나타낸 것이다. 혼합기의 입구 온도를 400°C 에서 600°C 까지 변화시켰다.

혼합기의 전환률은 400~500°C 의 범위에서 급격히 증가했다. 반면에 입구 온도 500°C 이상에서는 거의 일정했다. 이상의 결과들은 전환률 100%를 얻기 위해서는 입구 온도보다는 다른 운전 변수들의 영향이 더 크다는 것을 보여주고 있다. 그림 2.에 나타내어진 8 번 위치의 촉매 핀 표면 온도는 전환률과 비슷한 경향을 보여주고 있다. 핀 표면의 최대 온도는 750°C 이하 였으며, 이는 본 연구에서 사용된 Pd 촉매의 열적 안정 온도 범위내이다.

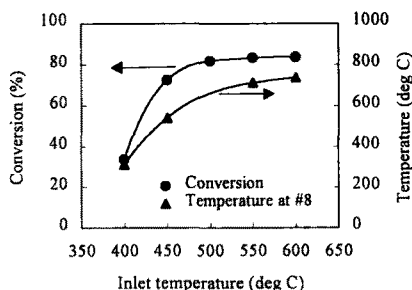


그림 5. 입구 온도가 변환률에 미치는 영향 (입구속도 0.194m/s, 당량비 0.286.)

전환률에 대한 당량비의 영향을 조사하기 위해, 혼합기의 당량비를 0.15 에서 0.42 범위에서 변화시켜 주었다. 이는 CH₄의 희박 연소 범위가 당량비 0.5 정도임을 고려할 때, 매우 희박한 연소 조건이다. 그림 6.은 당량비에 따른 전환률과 CO₂ 배출량을 나타내었다. 혼합기의 전환률은 당량비가 0.15 에서 0.42 로 변한 것에 비해서 단지 77%에서 82%까지 밖에 변하지 않았다. 입구 유속 0.194m/s 과 500°C 의 입구 온도의 운전조건에서는 당량비의 제어를 통한 혼합기의 전환률 향상은 매우 힘든 것으로 밝혀졌다.

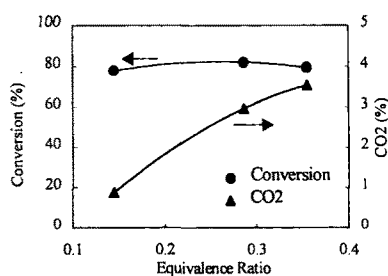


그림 6. 혼합기 당량비가 전환률에 미치는 영향. (입구속도 0.194m/s 입구 온도 500°C.)

먼저 언급된 대로, 촉매 열 교환기의 성공적인 실용화를 위해서는 완전 전환률 (100%) 에 도달하는 것이 필요하다.

현재의 실험결과는 그림 2.에 보여진 촉매 열 교환기로 만족할만한 전환률에 도달하지 못함을 말해주고 있다. 따라서, 튜브들의 배치나 튜브의 수 등과 같은 기하학적 변수들에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 이 부분은 수치계산 부분에서 언급하기로 한다.

혼합기의 입구 속도는 촉매 연소기에 중요한 운전 변수이다. 왜냐하면, 촉매 열 교환기에 들어가는 가스량을 결정짓기 때문이다. 혼합기 전환률에 대한 입구 속도의 영향을 분석하여 그림 7.에 나타내었다. 입구 속도가 0.11m/s 에서 0.23m/s 로 증가하는 동안, 반응률은 9.9%에서 84%로 감소했다. 이 결과는 입구 속도가 혼합기의 전환률에 중대한 영향을 미친다는 사실을 말해주고 있다. 입구 속도에 따른 전환률의 급격한 변화는 혼합기와 촉매 표면 사이의 열 전달과 관계가 있는 것으로 생각된다. 이 결과들은 촉매 표면적이 주어진 입구 속도에 대해 충분히 확보된다면, 혼합기의 전환률이 완전 연소에 이를 수 있음을 나타낸다. 그림 5.와 6.에 나타낸 대로, 입구 속도 0.194m/s 에서, 혼합기의 입구 온도와 당량비의 제어를 통해서 전환률 100%에 이르지 못했다.

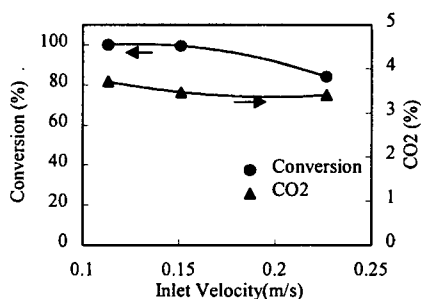


그림 7. 혼합기 입구 속도가 전환률에 미치는 영향. (당량비 0.286, 입구 온도 500°C.)

반면에, 입구 속도를 0.15m/s 이하로 낮추었을 경우, 전환률은 100%까지 상승

하였다. 실제 적용의 관점에서, 100%의 전환률을 유지하면서 동시에 입구 속도를 증가시키므로써, 촉매 열 교환기의 연소 강도를 가능한 높게 만드는 것이 필요하다. 이런 목적을 이루기 위해서, 우선, 촉매 표면적을 증가시키고, 핀 튜브의 배열이 촉매 반응에 최적하게 배치하는 방법이 요구된다.

핀 튜브의 수가 전환률에 미치는 영향에 대해 삼각 배열을 유지한 모양으로 또 다른 16 개의 핀 튜브를 제작했다. 이는 그림 2.에 나타낸 촉매 열 교환기의 핀 수의 두 배이다. 그림 8.에 나타냈듯이 입구 속도가 0.12m/s 에서 0.31m/s 까지 증가시켰음에도 불구하고, 혼합기의 전환률이 98.5%에 이르는 것을 알 수 있다. 위 결과들은 촉매 표면적이 혼합기의 완전 변환을 이룸에 있어서 결정적 변수임을 보여준다.

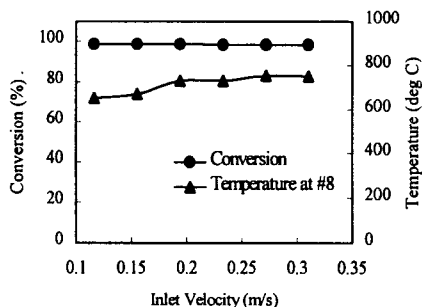


그림 8. 그림 2.에 나타낸 촉매 열 교환기 보다 2 배 향상된 핀 표면적을 갖는 경우, 혼합기 입구 속도가 전환률에 미치는 영향.

4.2 수치 계산 결과

촉매 열 교환기에서는 촉매 핀의 전 표면에 걸쳐서 혼합기의 유동을 균일하게 하는 것이 요구된다. 촉매 열 교환기 설계의 첫번째 단계로서, 주 유동에 반해 설치된 배플을 이용해서 혼합기 유동을 균일하게 만들려는 시도를 하였

다.(그림 2.(b)) 그림 9.는 촉매 열 교환기 내부에서의 혼합기의 속도벡터를 배플이 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 보여주고 있다. 배플이 없는 경우, 벽의 천장과 바닥부분 근처의 유동은 핀과 벽 사이의 공간으로 그냥 지나가버리는 경향을 보인다. 이는 혼합기가 촉매 핀에서 표면 반응을 일으키지 않은 채 지나쳐 버리는 것을 뜻한다.

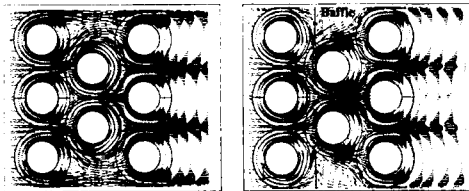


그림 9. 촉매 열 교환기 내의 혼합기 속도 벡터장. (입구속도 0.38m/s, 입구온도 400°C, 당량비 0.31) (a) without baffles, (b) with baffles.

혼합기의 유동 패턴을 개선하기 위해서, 그림 3.(b)에 나타냈듯이, 튜브의 첫번째 열과 두 번째 열의 사이에 배플을 설치하였다. 배플로 인해, 첫번째 핀 튜브 열을 지난 혼합기가 두 번째 핀 튜브 열을 향하게 되었다. 배플의 바로 뒷부분에서는, , 핀 위의 촉매 연소의 안정화에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각되어지는 재순환 영역이 발생되었다. 계산상으로 배플이 없을 경우에 혼합기의 전환률은 63.2%였으나, 배플이 설치된 경우 혼합기의 전환률은 74.0%로 증가하였다. 이 사실은 혼합기의 유동 패턴이 촉매 열 교환기의 촉매 연소 효율을 지배하는 매우 중요한 인자임을 보여준다. 수치 계산을 적절히 이용함으로써 촉매 열 교환기의 최적화된 모양을 효과적으로 설계하였다.

그림 10.은 배플이 있을 경우, 촉매 열 교환기내의 온도 분포를 보여준다. 1000°C 이상을 보이는 최고 온도는 세

번째 핀 튜브 열에서 나타난다. 그러나 첫번째 핀 튜브 열에서의 온도는 900°C 이하이다. 촉매 표면 반응은 주로 세 번째 핀 튜브 열에서 활발히 일어나는 것으로 보인다. 만약 전 핀 튜브 열을 통해서 표면 반응이 균일하게 일어나도록 제어된다면, 혼합기의 전환률은 증가할 것이며, 촉매 열 교환기의 크기 또한 줄어들 수 있을 것이다.

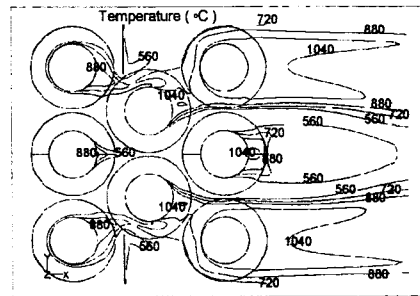


그림 10. 배플을 설치한 촉매 열 교환기 내의 온도 분포 (입구속도 0.38m/s, 입구온도 400°C, 당량비 0.31)

번째 핀 튜브 열 하류의 온도 분포를 고려했을 때, 세 번째 열의 가운데 핀 튜브는 그 위나 아래의 핀 튜브에 비해서 촉매 연소에 상대적으로 충분히 기여하지 못하는 것으로 나타났다. 세 번째 핀 튜브 열의 가운데 핀 튜브의 하류에는 560°C 이하의 온도범위를 갖는 넓은 지역이 존재한다. 이것은 가운데 핀 튜브를 지나가는 혼합기의 유속이 상대적으로 그 위나 아래의 핀보다 빠르기 때문으로 여겨진다. 따라서, 촉매 표면과 혼합기의 접촉 시간이 상대적으로 짧아진다. 이 결과는 세 번째 핀 튜브 열의 유동 패턴이 혼합기와 촉매 핀 사이의 충분한 접촉 시간을 갖도록 개선되어야 한다는 것을 의미한다.

그림 11.은 세 번째 핀 튜브 열 하류의 상세 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서, y 좌표는 y 방향으로 촉매 열 교환

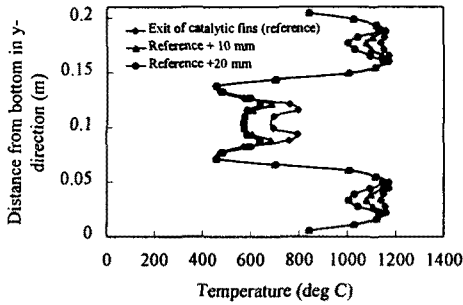


그림 11. 세 번째 핀 열 하류의 온도 분포. (0.38m/s inlet velocity, 400°C inlet temperature and 0.31 equivalence ratio)

기의 바닥으로부터의 거리를 말해주고 있다.(그림 4.) 그리고, 그림 설명에 나타나있듯이, 촉매 핀 출구는 세 번째 핀 튜브 열의 하류쪽 바로 뒤의 지점을 의미한다. 그림은 세 번째 열의 위 핀과 아래 핀 튜브의 하류쪽 온도가 가운데 튜브보다 더 높음을 보여준다. 최고온도는 1173°C에 이르는데, 이는 Pd 촉매의 열적 내구성 한계를 넘는 고온으로써, 촉매 핀의 촉매 분해를 일으키게 된다. 따라서, Pd 촉매의 촉매 활성성을 보호하기 위해서, 최고온도를 900°C 이하로 유지시키는 것이 요구된다.

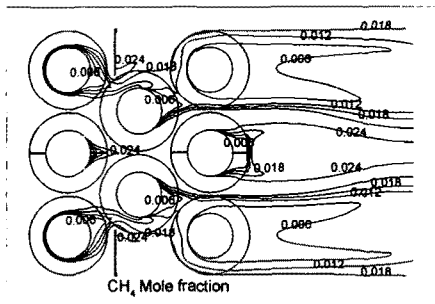


그림 12. Baffle 이 설치된 촉매 열 교환기내의 CH₄ 몰분율 (0.38m/s inlet velocity, 400°C inlet temperature and 0.31 equivalence ratio)

그림 12.는 촉매 열 교환기 내의 CH₄ 몰분율을 보여준다. 세 번째 핀 튜브 열의 맨 위, 맨 아래 핀 튜브의 하류에

서 가장 낮은 CH₄ 몰분율이 나타난다. 반대로, 세 번째 열의 가운데 핀의 하류부분에서 가장 높은 CH₄ 몰분율이 나타난다. 그림 10.에 설명되었듯이, 혼합기의 유속이 빠를수록, 혼합기와 촉매 핀 표면과의 접촉시간이 짧아지기 때문이다. 세 번째 열의 위, 아래 튜브 사이의 빠른 유동이 촉매 반응을 저하하고, 이로 인해 이 부분에서의 CH₄ 농도가 최대로 나타난다.

앞으로의 연구에는 극대화된 촉매 반응을 위한 최적화된 핀들의 배치가 더욱 고려되어야 할 것이다. 또한, 촉매 핀에서 발생된 열이 튜브 내의 공기로 전달될 경우, 촉매 연소 특성은 크게 바뀔 것이 분명하다. 따라서, 촉매 핀과 핀 튜브 내부의 공기 사이의 열 교환이 있을 경우에 열 전달률과 촉매 표면 반응률이 동시에 고려되어야 한다.

5. 결론

열 발생과 열 교환 기능이 하나의 장치에 통합된 촉매 열 교환기를 설계하였고, 실험과 수치 계산을 통해서 특성을 분석하였다. 핀 튜브는 SUH 409로 만들어졌고, 핀 표면에 Pd 촉매가 담지되었다.

혼합기의 변환은 혼합기의 입구 온도와 당량비보다 혼합기의 입구 속도에 의해 큰 영향을 받는다. 실용적인 관점에서, 전환률 100%를 유지하면서 혼합기의 입구 속도를 증가시킴으로써, 촉매 열 교환기의 연소 강도를 극대화하는 것이 필요하다. 이를 위해서, 핀 튜브의 촉매 표면적을 충분히 증가시키고, 핀 튜브 배치를 촉매 반응에 최적화시키는 것이 요구된다.

촉매 열 교환기 내의 온도와 CH₄ 몰분율이 수치적으로 분석되었다. 촉매 연소는 세 번째 열의 핀 튜브들의 주변에서 주로 일어난 반면에, 첫 번째 열의 핀 튜브들은 촉매 연소에 거의 기여를

하지 못했다. 세 번째 열의 핀 튜브들에서조차, 위 핀 튜브 열과 아래 핀 튜브 열에서 연소반응이 주로 발생한 반면, 가운데 부분의 핀 튜브 열에서는 연소가 거의 일어나지 않았다. 이들 결과들은 혼합기의 유동 패턴이 극대화된 전환률에 도달하는데 결정적인 역할을 한다는 것을 보여준다.

Workshop on Catalytic Combustion, Amsterdam, 1996.

7. Yao, Y-F., Oxidation of alkanes over noble metal catalysts, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* 1980, 19, 293-298
8. Markatou, P., Pfefferle, L. D., and Smooke, M. D., A computational study of methane-air combustion over heated catalytic and non-catalytic surfaces, *Combustion and Flame*, 93(1993), 185-201.

참고문헌

1. Jacques Saint-Just, Jan der Kinderen, Catalytic combustion: from reaction mechanism to commercial application, *Catalysis Today*, 29(1997), 387-395.
2. Seo, Y. S., Kang, S. K and Shin, H. D., Catalytic combustion of lean premixed mixture in catalytically stabilized thermal combustion, *Combustion Science and Technology*, 1999, Vol.145, pp.17-35.
3. Schlegel, A., Benz, P., Griffin, T., Weisenstein, W., Bockhorn, W., Catalytic stabilization of lean premixed combustion: Method for improving NOx emissions, *Combustion and Flame* 105 (1996) 332-340.
4. Seo, Y. S., Kang, S. K. and Shin, H. D., The catalytic burner using propane and toluene alternately for the drying system of the textile coating, *International Journal of Energy Research*, Vol. 23(1999), No.6, pp. 543-556.
5. Sadamori, H., Application concepts and evaluation of small scale catalytic combustors for natural gas, 3rd international workshop on catalytic combustion, Amsterdam, 1996.
6. Polman, E. A., Kinderen, J., M. and Waveren, A., Novel compact steam reformer for fuel cells with heat generation by catalytic combustion augmented by induction heating, 3rd Proceedings of the International