

## 모형소각로의 촉매에 의한 배기가스 정화특성에 관한 연구

이용후† · 이화신\* · 이진석\*\* · 이도형\*\*\*

(원고접수일 : 2006년 9월 1일, 심사완료일 : 2006년 11월 30일)

### A study on the pollutant reduction using catalyst in model furnace

Yong-Hoo Lee† · Wha-Sin Lee\* · Jin-Seok Lee\*\* and Do-Hyung Lee\*\*\*

**Abstract** : In proportion to the increase of industrial development, emission troubles were concerned as global issue. For these reasons, so many researchers and associated institutes effort to reduce pollution with new technology and various devices. As a kind of these methods, we used catalysts as a after-treatment system. At first, we made equipment of model furnace. And various catalysts were equipped at exhaust duct of combustion system, and excess air ratio( $\alpha$ ), change cell numbers, catalyst materials(Pt, Pd) were changed as experimental conditions. With these various condition, temperature, NOx, CO, HC, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentration were measured. As a result, NOx conversion increased with increasing of cell number in Pd catalyst. And Pt catalyst became 100% conversion at 200 and 300 cell. Also, Pt catalyst was better than Pd catalyst at  $\alpha=1.5$  in this condition. In addition, CO and HC concentrations were decreased at  $\alpha=1.5$  with Pd catalyst.

**Key words** : Catalyst(촉매), Model furnace(모형 소각로), Conversion(정화율), Emission(오염 물질), After-treatment(배기후처리)

### 1. 서 론

과학기술의 급속한 발전과 더불어 산업화에 필수적인 엔진, 발전설비, 그리고 각종 산업로에서 발생하는 배출가스에 의하여 대기오염은 더욱 심각해지고 있다. 이에 대응하여, 최근 환경에 대한 인식 변화와 관심이 더욱더 커지고 있으며, 지구온난화 방지를 위한 기후변화협약 등 여러 환경문제와 함

께 국제적으로 커다란 문제로 인식되고 있으며<sup>(1),(2)</sup>, 이를 위한 저공해 연소시스템 개발 및 연소 가스를 줄이기 위한 배기후처리 시스템에 관한 기술 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(3)-(6)</sup>.

촉매는 반응속도를 증가시키는 효과를 가지는 제 3의 물질로서 이를 이용한 후처리 기술은 상당히 연구가 되어있고, 실용화단계에 있다. 이러한 촉매에 의한 후처리기술에 관한 연구는 대부분 디젤 엔

† 책임저자(부경대학교 대학원 기계공학부), E-mail:wiztown@gmail.com, Tel:051)335-8221

\* 한국조선기자재연구원

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 부경대학교 기계공학부

진 및 천연가스 등의 내연기관에 관한 것으로서 각종 산업로 및 가스터빈 연소기에의 적용에 관한 연구보고는 많지 않다. 따라서 본 연구는 각종 산업로에서 배출되는 연소오염을 줄이기 위한 배기후처리 시스템으로써 불균일촉매를 설치하여, 촉매층 전후의 오염물질 정화특성을 정량적으로 밝히는 것을 목적으로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 모형 산업로를 제작하고 연소장치 배기덕트에 촉매를 부착하여, 다양한 연소조건 및 촉매의 종류변화에 따른 촉매층 입출구에서의 평균온도, 미연탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>) 및 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 등의 농도변화를 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 연소기의 공기 및 연료공급계를 나타낸 것이다. 공기는 송풍기(3HP)에서 직경 52mm의 공기공급 원관을 통하여 동축으로 공급되며, 압력백동을 최소화하기 위해 서지탱크(surge tank)를 거친 후 연소기 내로 공급되도록 하였다. 연료는 연료탱크에서 공급되며, 압력조정기와 가스유량계를 지나 연료노즐로부터 분사되어 연소기 내부로 공급된다. 본 실험에 사용된 연료는 상용 프로판가스(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 사용하였으며, 연료 분사압력은 약 0.2kg/cm<sup>2</sup> 정도이다. 본 연구의 목적에서 밝힌 바와 같이, 배기 후처리 연구를 위하여 모형소각로 후류부에 후처리 장치를 설치하고, 그 영향을 고찰하고자 한다.

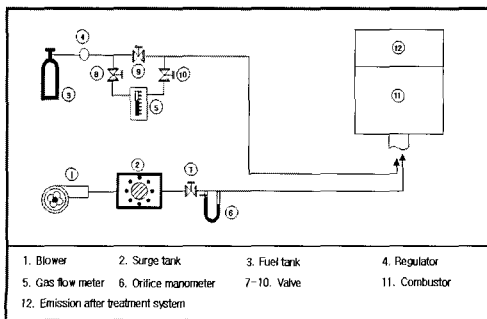
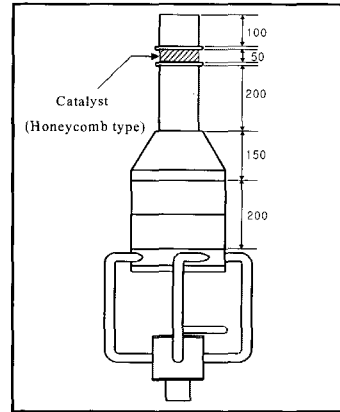
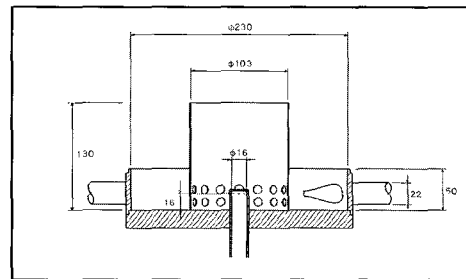


Fig. 1 Schematic diagram of experimental paratus



(a) Model furnace



(b) Inner diagram of model furnace

Fig. 2 Model furnace

또한 Fig. 2의 (a)와 (b)는 모형소각로의 장치도 및 연료와 공기유입부의 세부도를 나타낸 것으로, 송풍기에 의해 공급된 공기는 분할 탱크를 거쳐 연소기의 접선방향으로 유입되는 4개의 파이프를 지나, 다시 수직방향 라이너 홀을 지나게 된다. 이때 연료는 주류방향에 대해 90°인 각각 직경 1mm인 8개의 분사구를 가진 노즐에 의해 분사된다.

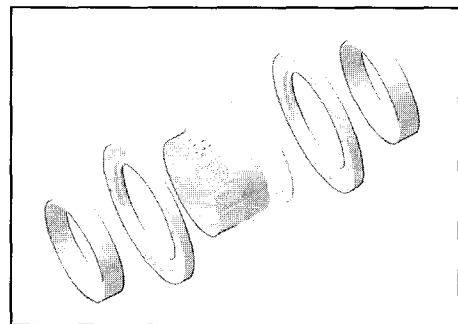


Fig. 3 Assembly of honeycomb type catalyst part

모형 소각로에 설치된 배기 후처리시스템은 Fig. 3에서와 같이 연소기와 탈착이 가능하도록 되어 있으며, 후처리 시스템 전·후면에 각각 배기덕트를 장착시켰다. 또한 양쪽에 플랜지를 가공하여 장착함으로써 촉매의 교체가 용이하도록 하였다. 본 실험에 사용된 촉매의 규격 및 조건은 두께 50mm, 직경  $\phi 93\text{mm}$  의 1.0g/Pe 로 주문 제작되어진 것으로서, 촉매의 내열한계온도는 약  $800^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$  정도이다.

2.2 실험조건

후처리 시스템을 연구함에 있어서 촉매의 전·후 온도 및 NOx를 포함한 각 화학종의 농도를 측정하여 증감을 비교·분석하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 촉매종류, 셀의 변화, 공기과잉을 변화에 따른 각각의 오염물질 농도 변화를 조사하고자 한다.

한편, 촉매의 성능평가를 함에 있어서는 단위 시간당 가스통과량( $\text{Nm}^3$ )을 촉매의 체적( $\text{m}^3$ )으로 나눈 값, 즉 공간속도(SV: Space Velocity) 값으로써 단위 시간당 촉매가 처리할 수 있는 처리가스의 양을 나타내는 것이 일반적이다<sup>(7),(8)</sup>. 따라서 촉매의 체적에 대한 가스통과유량 변화는 공간속도의 변화로 나타난다. 그러나 촉매의 셀수 변화에 대해서는 공간속도 변화로 나타나지 않으므로, 셀수변화에 따른 촉매 표면적의 변화가 촉매 정화 성능에 끼치는 영향도 조사하고자 한다. 이상과 같은 특징을 고려하여 본 연구에서는 다음과 같은 조건 하에서 실험을 실시하였다.

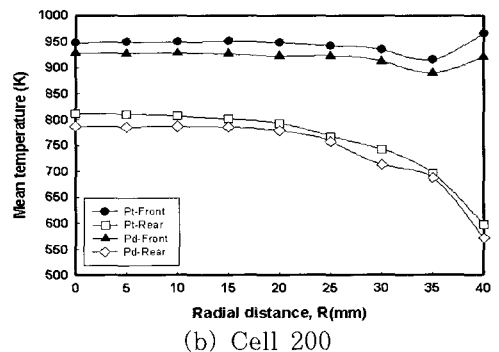
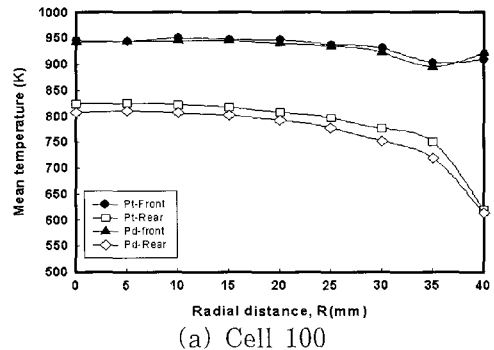
Table 1 Experimental conditions

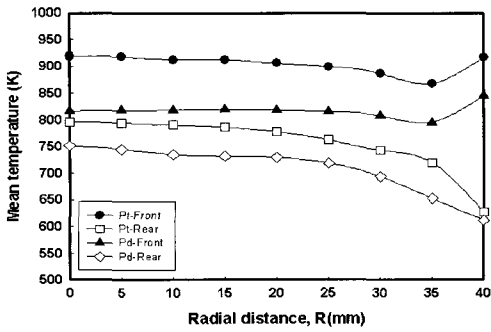
Item	Precious metal	Cell number (cell/in <sup>2</sup> )	Excess air ratio (a)	Metal loading (g/pe)	Space velocity (hr <sup>-1</sup> )
C <sub>1</sub>	Pt	100	1.5	1	25941
C <sub>2</sub>		200			
C <sub>3</sub>		300			
C <sub>4</sub>	Pd	100			
C <sub>5</sub>		200			
C <sub>6</sub>		300			
C <sub>7</sub>	Pt	100	1.8		30811
C <sub>8</sub>		200			
C <sub>9</sub>		300			
C <sub>10</sub>	Pd	100			
C <sub>11</sub>		200			
C <sub>12</sub>		300			

실험조건은 Table 1과 같이 공기과잉을 1.5와 1.8에서, 촉매종류 및 셀수 변화에 따른 촉매층 입·출구측 배기덕트내에서 평균온도, NOx농도 등을 측정하여 배출물 특성을 분석하였다. 이때 촉매는 Pt와 Pd의 두가지 종류를 사용하였으며, 셀수는 100, 200, 300Cell를 사용하여 이에 따른 배출가스 특성을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

공기과잉을 1.5에서, 촉매변화에 따른 촉매전·후 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 촉매전의 반경방향 온도분포는 벽면부근을 제외하고는 대체로 일정하다. 촉매후의 온도는 촉매 전 단면과는 달리 전반적으로 온도가 낮아졌다. 이것은 촉매 내부에서 산화반응에 의한 온도상승효과 보다는 촉매층에서의 복사열 회수로 인한 축열의 영향이 매우 큰 것으로 생각된다. 한편, 100, 200Cell인 경우, 촉매 이전 온도는 촉매의 종류와 관계없이 거의 차이를 보이지 않는 반면, 300Cell의 경우 그 차이가 매우 많음을 알 수 있다.





(c) Cell 300

Fig. 4 Temperature distribution by change of cell number at excess air ratio 1.5

Fig. 5는 공기과잉율 1.8에서의 300Cell 전후 온도를 나타낸 것이다. 공기과잉율 1.8에서의 300Cell 전후온도를 나타낸 Fig. 4의 (c)와 비교해보면, 공기과 Fig. 5 Temperature distribution of cell number 300 at excess air ratio 1.8 인을 1.5에서는 촉매종류에 따른 온도차가 전면에서는 50℃, 후면에서 100℃정도 차이가 나는 반면, 공기과잉율 1.8에서는 촉매 변화에 따른 온도차가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 공기과잉율 1.5에서는 연소시 발생하는 그을음이 셀내부의 유로를 차단하여 유동저항을 일으켰기 때문으로 생각된다.

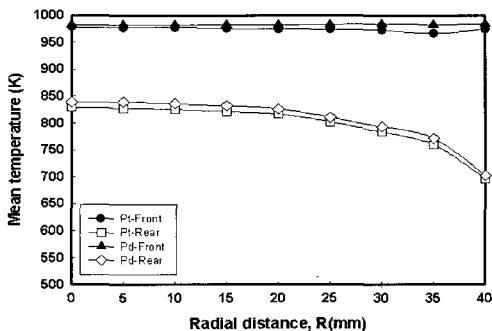


Fig. 5 Temperature distribution of cell number 300 at excess air ratio 1.8

Fig. 6은 공기과잉율 1.5에서 Cell Number 100, 200, 300에서 Pt촉매와 Pd촉매의 NOx 정

화율을 나타낸 것이다. 먼저 촉매변화에 따른 정화 특성을 살펴보면, 100Cell의 경우 Pd촉매는 거의 효과가 없는 반면, Pt촉매는 10% 이상의 효과를 나타내고 있으며 200Cell에서는 Pd촉매는 20% 정도의 정화율을 나타내고 있는 반면, Pt촉매의 촉매 후 NOx 농도는 0ppm 인 정화율 100%로 나타났다. 그리고 300Cell에서는 Pt 및 Pd 모두가 100% 정화율로 나타났다. 따라서, Cell Number 100 및 200의 결과로 보아 본 조건에서는 Pd촉매보다 Pt촉매가 더 NOx의 환원반응이 활발함을 알 수 있다. 또한 Cell 변화에 따른 NOx의 정화특성은, Pd 촉매의 경우 100Cell은 거의 효과가 없으며, 200cell은 20%의 정화율은 보이며, 300Cell은 100%의 정화율을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 배기가스와 촉매와의 접촉면이 많아짐에 따라 활발한 환원반응이 일어남에 따른 것으로 생각되어진다. 또한 Pt촉매는 100Cell의 경우 10%의 정화율을 나타내지만, 200, 300Cell에서는 모두 뛰어난 정화율을 나타내고 있다. 따라서, 촉매가 적절한 반응을 하기 위해서는 배출가스와 촉매층이 반응하는 적절한 단면적이 존재함을 알 수 있다.

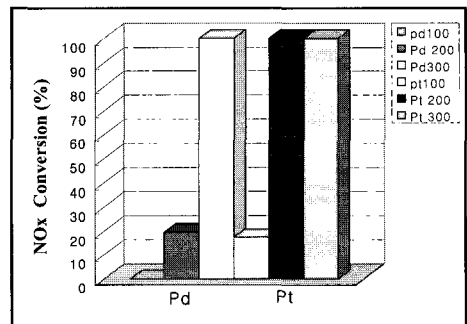


Fig. 6 Mean conversions at excess air ratio 1.5

Fig. 7과 Fig. 8은 공기과잉율 변화에 따른 Pd 촉매와 Pt촉매의 평균정화율을 나타낸 것으로써, 공기과잉율 1.5에서, Pt촉매는 100Cell을 제외한 다른 촉매에서는 100%의 정화율을 나타내고 있으나, 공기과잉율 1.8에서는 오히려 NOx량이 증가함을 보이고 있다. 또한 Pd촉매의 100cell의 경우 공기과잉율 1.5에서는 촉매의 효과는 전혀 없으나, 공기과잉율 1.8에서는 약 5%정도의 정화율을 보

이고 있으며, 200Cell, 300Cell은 각각 20%와 100%에서 10%정도로 낮아짐을 알 수 있다. 따라서, 공기과잉율이 증가하였을 경우 전반적으로 NOx의 정화율이 매우 낮음을 알 수 있으며, 이로써 촉매반응이 활성화되기 위해서는 적정 공기과잉율이 존재하며, 본 연소기에서는 공기과잉율 1.8보다는 공기과잉율 1.5가 훨씬 촉매의 NOx정화율이 좋음을 알 수 있다.

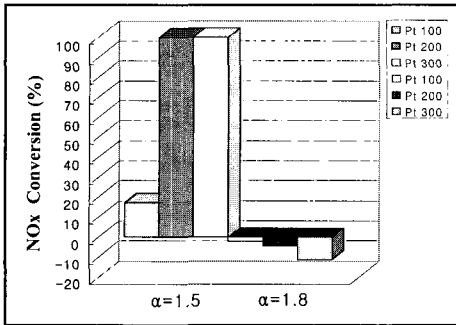


Fig. 7 Mean NOx conversion of Pt catalyst

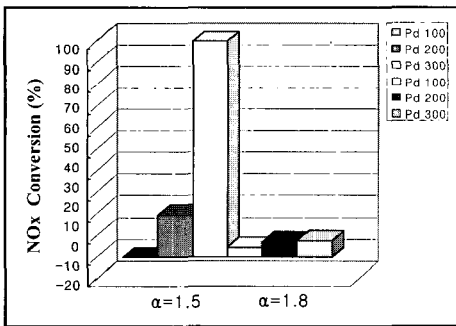


Fig. 8 Mean NOx conversion of Pd catalyst

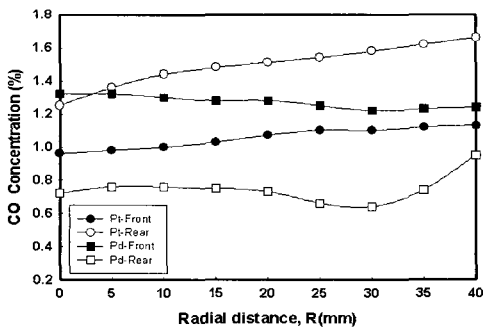


Fig. 9 CO concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.5

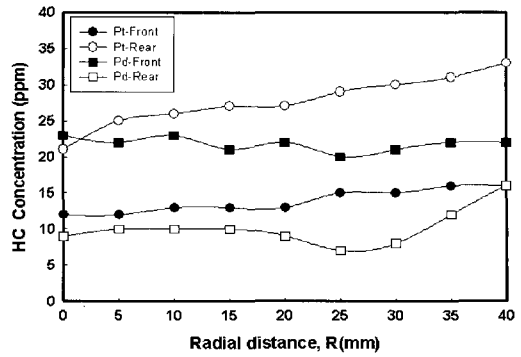


Fig. 10 HC concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.5

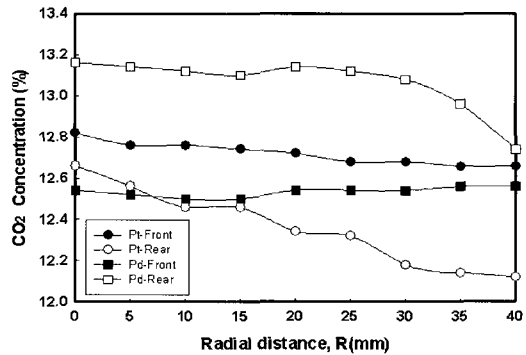


Fig. 11 CO2 concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.5

Fig. 9~Fig. 11은 공기과잉율 1.5에서 200Cell의 CO, HC 및 CO<sub>2</sub>의 농도분포를 나타내었다. CO의 촉매전후 농도는, Pt촉매의 경우 오히려 증가하였으며 Pd 촉매는 감소하는 경향을 나타내고 있다. HC 역시 Pt촉매는 증가하였으며, Pd 촉매는 감소하였다. 따라서, 공기과잉율 1.5에서는 CO, HC와 같은 화학종의 정화에는 Pd 촉매가 더 우수함을 알 수 있다.

한편, 촉매전면의 CO 및 HC농도는 반경방향으로 거의 변화가 없는 반면에 촉매후면은 반경방향으로 갈수록 증가함을 알 수 있다. 이는 벽면 부근에서의 벽면효과와 반경방향으로 갈수록 촉매후면의 온도가 낮아짐에 따라 활성화가 상대적으로 떨어짐에 따른 것으로 생각된다. CO<sub>2</sub>의 경우, Pt촉매는 감소하며, Pd촉매는 증가하고 있으며 위의 HC 및 CO 반응과 일치하고 있다.

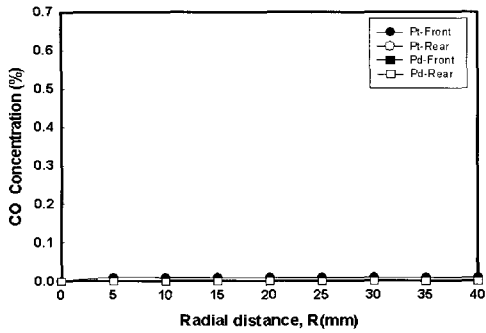


Fig. 12 CO concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.8

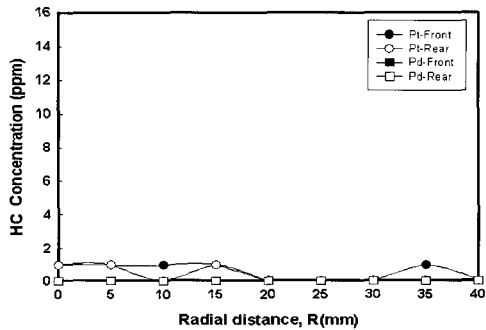


Fig. 13 HC concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.8

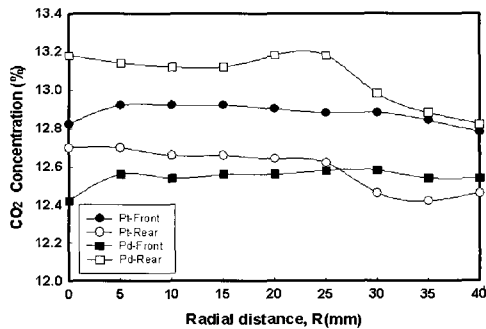


Fig. 14 CO<sub>2</sub> concentration of cell number 200 at excess air ratio 1.8

Fig. 12와 Fig. 13은 공기과잉율 1.8에서 200 Cell의 CO 및 HC 농도분포를 각각 나타낸 것으로서, CO 및 HC는 모두 거의 나타나지 않았으며, Fig. 14에 나타낸 공기과잉율 1.8에서 200Cell의 CO<sub>2</sub> 경우, 전후 농도분포는 공기과잉율 1.5와 유사한 형태를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 실험에 사용된 모형소각로에서, 공기과잉율, 촉매 물질, 촉매의 Cell 수 변화에 따라 연소 오염 물질 저감 특성을 고찰한 결론은 다음과 같다.

1. 300Cell의 경우 공기과잉율 1.8에서는 촉매종류에 따른 전·후 온도차가 거의 없는 반면, 공기과잉율 1.5는 그 차이가 많이 남을 알 수 있는데, 이는 연소시 발생하는 Soot에 의한 유로 차단으로 인한 유동저항에 의한 것으로 생각되어진다.
2. Cell 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 정화특성을 살펴보면, 공기과잉율 1.5에서 Pt촉매는 100Cell에서는 10%이지만 200 및 300Cell에서는 100%의 정화율을 나타내고 있다. 또한 Pd촉매는 100Cell에서는 거의 효과가 없지만, 200 및 300Cell에서 각각 20%, 100%의 정화율을 나타내고 있다. 따라서 촉매가 적절한 반응을 하기 위해서는 배출가스와 촉매층이 반응하는 적절한 단면적이 존재함을 알 수 있다.
3. 앞의 결과에서 보듯이 공기비 1.5에서는 Pd촉매보다는 Pt촉매가 NO<sub>x</sub>정화에 유리함을 알 수 있다. 그러나 공기비 1.8에서는 Pt촉매의 경우 오히려 NO<sub>x</sub>량이 증가함을 알 수 있으며, Pd촉매에서는 200, 300Cell의 NO<sub>x</sub>정화율은 각각 20%와 100%에서 10%정도로 낮아졌다.
4. 공기과잉율 1.5에서 200Cell의 CO, HC 및 CO<sub>2</sub>의 농도 분포는 Pd 촉매에서는 CO 및 HC가 감소한 반면, Pt촉매에서는 오히려 증가하였으며, CO<sub>2</sub>는 이와 반대현상을 나타내었다. 따라서 CO 및 HC의 정화에는 Pd촉매가 유리함을 알 수 있다. 한편 공기과잉율 1.8에서는 HC 및 CO가 발생하지 않았다.

#### 참고문헌

- [1] 주수영 외 1명, "지구 온난화에 관한 최근의 국제화 동향과 대응책", 韓國大氣保全學會誌, Vol. 7, No. 1, pp.73~80, 1991.
- [2] John Houghton, "Global warming",

Reports on progress in physics, 2005.

- [3] Dong-Shin Shin, "Low NOx Combustor in a Industrial Gas Turbine". 大韓機械學會誌, Vol. 34, No. 12, pp.929~939, 1994.
- [4] 노동순, "환경 친화적 산업용 가스 및 석탄 청정연소기술 개발", 한국에너지기술연구원, 2004.
- [5] Stenhen R. Turns, 노영수 외 3명 공역 "연소공학", 교보문고 pp.172~177, 1999.
- [6] 최병철, "배기후처리공학", 바로, 2001.
- [7] 송광섭, "축매연소를 활용한 고효율/청정 산업 응용 장치의 개발", 한국에너지기술연구원, 2004.
- [8] 윤병석 외 1명, "소각로에서 배출되는 VOCs 및 염소계 유기화합물의 축매산화에 관한 연구", 韓國環境工學會誌, Vol. 24, No. 7, pp.1263~1254, 2002.



**이화신 (李和信)**

1981년 3월생. 2004년 부경대학교 기계공학과 졸업(공학사) 2006년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 관심분야: 연소공학, 환경에너지, CFD



**이진석 (李鎭錫)**

1974년 5월생. 2000년 부경대학교 기계공학과 졸업(공학사) 2002년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2004년 부경대학교 대학원 기계공학부 박사 수료. 관심분야: 연소공학, CFD



**이도형 (李度衡)**

1954년 8월생. 1980년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1982년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1989년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1983-현재 부경대학교 교수. 관심분야: 연소공학, 환경에너지, CFD, 연료전지

**저 자 소 개**



**이용후 (李容厚)**

1975년 5월생. 2000년 경남대학교 기계공학과 졸업(공학사) 2002년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2004년 부경대학교 대학원 기계공학부 박사 수료. 관심분야: 연소공학, 환경에너지