

탈질촉매 내 열화특성과 유동상태에 관한 연구

황 승 민*

호서대학교 벤처전문대학원 보건환경학과
(2010년 2월 18일 접수; 2010년 7월 21일 수정; 2010년 8월 26일 채택)

A Study on Degradation Characteristic and Flow Behavior in De-NO_x Catalyst

Seung-Min Hwang*

Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University, Seoul 137-867, Korea
(Manuscript received 18 February, 2010; revised 21 July, 2010; accepted 26 August, 2010)

Abstract

In this study, the indirect correlation of degradation characteristic and flow behavior in the de-NO_x catalyst is investigated experimentally. The inner flow behavior in the de-NO_x catalyst is varied from turbulent flow to laminar flow and the degradation of the de-NO_x catalyst is remarkably affected by the inner flow. The degradation of the catalyst is increased in the upstream region near the inlet because injected turbulent flow enhances the adhesion of ash particle on the catalyst surface. The degradation of the catalyst near the inlet also governs the overall efficiency of the catalyst. The amount of adhered ash particles on the catalyst surface decreases as they progress downstream. This is due to the inner flow transition from turbulent flow to laminar flow.

Key Words : De-NO_x, Catalyst, Degradation, Turbulent-laminar transition

1. 서 론

화력발전소로부터 배출되는 질소산화물(NO_x)은 입자상 물질, 황산화물(SO_x)과 함께 가장 중요한 환경 오염 물질로서 저비용, 저소요 동력 및 고효율의 저감이 중요하다. 화력발전소의 NO_x 저감대책에는 연소 조건을 조절하여 NO_x 생성을 저감하는 저 NO_x 연소 기술이나 배기가스에 포함된 NO_x를 환원반응에 의하여 제거하는 배연탈질기술이 이용되고 있지만 대폭적인 저감을 꾀하기 위해서는 탈질장치의 적용이 불가

피하다(Hwang, 2005; 홍, 2007) 탈질장치로는 일반적으로 촉매식의 배연탈질 장치가 이용되고 있으며 이것은 매우 고성능인 동시에 용이한 방식이다. 그러나 촉매식 탈질장치는 장시간의 운전에 의해 탈질촉매가 열화하기 때문에 주기적인 교환이나 재생이 필요하다.

탈질촉매의 열화는 촉매의 소결, 촉매표면에 재 입자의 부착 등 촉매 내 유동에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 탈질촉매 수명의 정확한 예측 및 개선을 위해서는 촉매 내 열화특성과 유동상태 사이의 관계를 이해하는 것이 무엇보다 중요하다(Komori 등, 1982; Kurose 등, 2006, 2007; Tanno 등, 2009). 따라서 본 연구에서는 탈질촉매 내 열화특성과 촉매 내부 유동 상태에 대하여 각각 실험적으로 고찰하여, 촉매 내 열화특성과 유동상태 사이의 간접적인 상관관계에 대해

*Corresponding author : Seung-Min Hwang, Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University, Seoul 137-867, Korea
Phone: +82-2-523-3015
E-mail: hwangsm@hoseo.edu

알아보고자 한다. 탈질촉매의 열화특성은 실험실 스케일의 소형 탈질촉매 성능평가 장치를 이용하여 사용된 촉매와 새 촉매 사이의 열화를 비교하는 것으로 평가하였다. 또한 촉매 내부 유동상태는 소형 탈질촉매 성능평가 장치와 같은 구조를 갖는 아크릴제의 모의 장치를 제작하여 촉매 내부 유동상태에 대해 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 탈질촉매 내 열화특성

Fig. 1에 탈질촉매 내 열화특성을 평가하기 위한 소형 탈질촉매 성능평가 장치의 개략도를 나타내었다. 장치는 유입되어지는 공기의 조성, 습도, 속도와 온도, 촉매의 길이와 각주 및 NH_3/NO_x 의 분자비를 조절할 수 있다. 따라서 $\text{LDA}(\text{LDA}=\text{Q}/\text{S}_c, \text{Q} : \text{질량유량}, \text{S}_c : \text{촉매의 단면적})$ 혹은 $\text{AV}(\text{AV}=\text{Q}/\text{S}_s, \text{S}_s : \text{촉매의 표면적})$ 값을 화력발전소와 동일한 값으로 조절할 수 있다. 유입 유량은 100 l/min까지 공급 할 수 있으며 내부 유동은 전기히터에 의해 400 °C까지 가열 할 수 있다. 열 유량 조절계를 통한 질량 유량, 반응기 내의 온도 및 각 가스성분은 가스 분석계에 의해 측정되어지며 컴퓨터 내에 기록되어진다.

촉매 내 열화특성 평가에서는 화력발전소에서 100,000시간 동안 사용된 촉매와 새 촉매를 이용하여 비교하였다. 촉매의 길이는 600 mm이며 각주는 7 mm이다. 촉매의 주요 성분은 산화티타늄(TiO_2), 삼산화텅스텐(WO_3) 및 오산화바나듐(V_2O_5)이다. 질량유

량은 $\text{LVA}=6 \text{ m/s}$ 의 조건으로 설정하였으며, 내부 흐름의 온도는 365 °C, 내부 가스 성분은 $\text{O}_2=4\%$, $\text{CO}_2=0\%$, $\text{NO}=300 \text{ ppm}$, $\text{SO}_2=500 \text{ ppm}$ 및 $\text{H}_2\text{O}=8\%$ 로 설정하였다. NH_3/NO_x 의 분자비는 실제 화력발전소와 거의 같은 값인 0.82이다. 탈질효율은 유입가스 내에 NH_3 를 주입하여 배출되는 가스 내 NO_x 농도를 측정하는 것에 의해 평가하였다.

2.2. 탈질촉매 내 유동상태

탈질촉매 내 유동상태를 평가하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 측정부 및 모의 촉매는 아크릴로 제작하였으며 모의 촉매입구 상류에 기류에 의해 자연적으로 회전하는 날개를 설치하였다. 촉매 입구 상류에 회전날개를 설치한 이유는 본 연구에 이용한 장치가 작기 때문에 촉매 입구부에서 실제 탈질 장치와 유사한 난류조건을 모의 할 수 없는 점이 촉매 입구 근방의 난류영역에 의한 영향이나 촉매성능을 평가하는데 어려움으로 남아있었다. 따라서 촉매입구 상류에 자연적으로 회전하는 날개를 설치하여 실제 탈질 장치와 유사한 난류조건이 모의 가능하도록 하였다.

회전날개를 설치한 위치로부터 모의 촉매 입구까지는 관경을 완만하게 하였다. 모의 촉매부는 열화특성을 평가하기 위한 소형 탈질촉매 성능평가 장치와 동일하도록 총형 각각 7 mm의 각주로 하였으며, 셀은 총형 3개씩 총 9개이다. 모의 촉매 두께가 1 mm이기 때문에 모의 촉매부의 크기는 총형 각각 25 mm이다. 본 연구에서는 모의 촉매 입구부의 중심을 원점으로 하여 주류방향을 z축, 반경방향을 x축 및 연직방향을 y

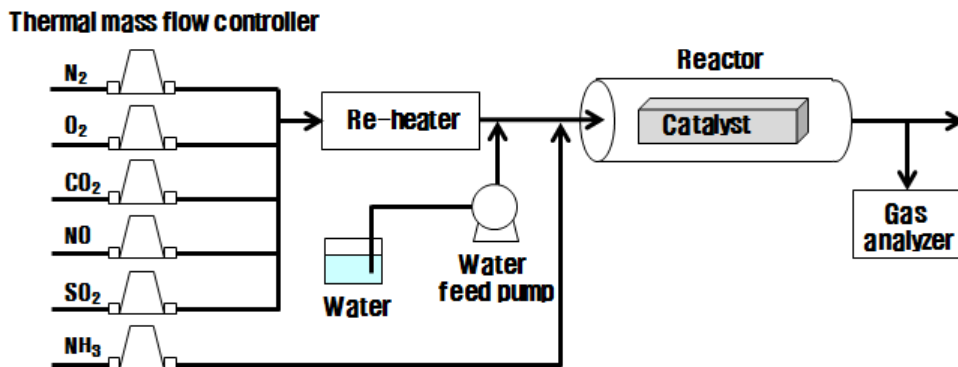


Fig. 1. Schematic diagram of test apparatus on degradation of de-NO_x catalyst.

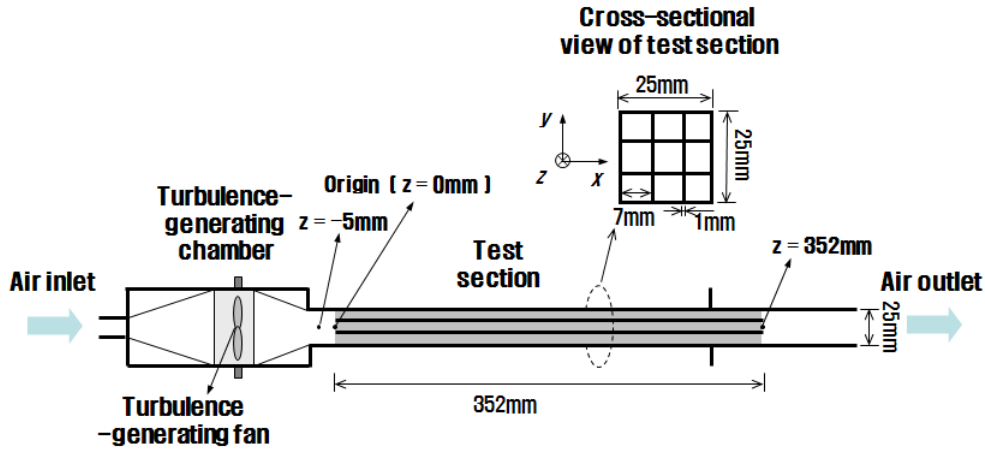


Fig. 2. Schematic diagram of test apparatus for flow behavior in the catalyst.

측으로 하였다.

촉매 내 유동상태 평가는 모의 촉매 내 1개의 각주 유로의 레이놀즈 수 Re ($Re = d_h U_b / \nu$)가 1000 혹은 800으로 되도록 전유량을 설정하여 모의 촉매 상류부 ($z = -5$ mm) 및 내부($z \geq 0$ mm)의 유동장을 측정하였다. 여기서, d_h 는 각주 유로경(7 mm), U_b 는 단면 평균 유속이므로 1개의 모의 촉매 내 각주를 흐르는 유체의 단면 평균유속은 $Re = 800, 1000$ 의 경우 각각 약 1.7, 2.1 m/s가 된다.

촉매 내 유동상태는 2차원 LDV(laser Doppler velocimetry, LDV)를 이용하여 계측하였다. 엄밀히 말하자면 LDV는 유체의 속도를 직접 계측하는 것이 아니라 유체를 따라 흐르는 미립자(추적 입자)의 속도를 측정하여 그 속도를 유체속도로 간주한다. 그 때문에 측정점을 통과하는 추적 입자의 선택이 중요하다. 추적 입자경은 유동장의 추종성을 고려할 때 작으면 작을수록 좋다. 그러나 너무 작으면 도플러 신호가 약하거나 노이즈에 대한 도플러 신호의 비율(signal noise rate, SNR)이 작아져 측정의 정밀도가 나빠질 수 있다. 또한 입자의 진구도(true circularity)도 중요하며 진구도가 나쁘면 SNR은 작아지고 동시에 측정의 정밀도도 영향을 받는다(Durst 등, 1976). 따라서 본 연구에서는 유동장의 추종성과 진구도를 고려하여 중위경 $8.0 \mu m$ 의 알루미늄을 추적입자로 이용하였다. 컴프레서로부터 공급된 공기는 질량 유량계에서 유량

을 제어한 후, 레이저 도플러 유속계에 의한 유동계측에 필요한 추적입자와 함께 측정부로 이동한다.

Fig. 3에 LDV 광학계측 시스템의 개략도를 나타내었다. LDV 광학계는 레이저를 삽입하는 송광부와 산란광의 수광부로 구성된다. 광 분리기(beam splitter)에 의해 2개로 분리된 레이저는 렌즈에 의해 집광되며 그 교차부가 빛 광도의 명암 간섭 줄무늬(fringe)를 가지는 측정점이 된다. 이 측정점을 통과하는 유체에 추종하는 추적입자는 간섭 줄무늬에 대응하는 빛을 산란하고 그 산란광은 수광 광학계를 통하여 전기신호(Doppler burst 신호)로 변환되며, 그 주파수(f_d)를 구하는 것으로 입자 속도를 결정할 수 있다.

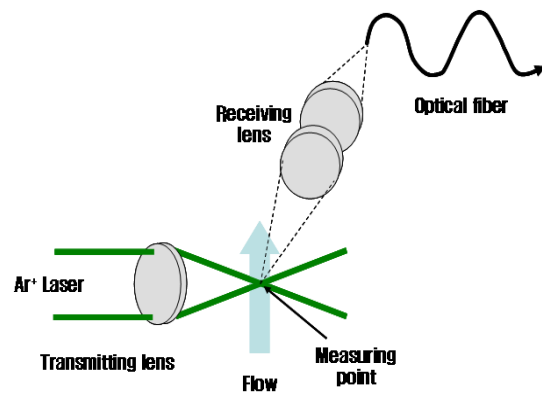


Fig. 3. Optical arrangement of LDV(laser Doppler velocimetry).

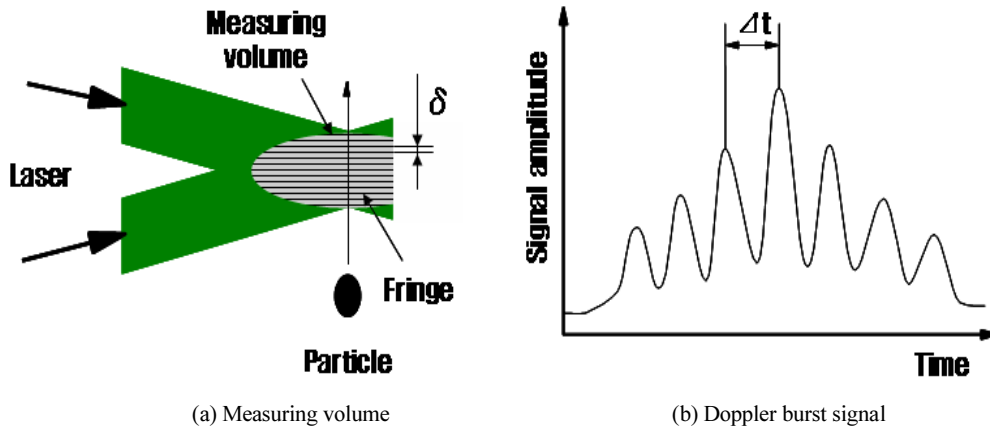


Fig. 4. Detail of measurement area and Doppler burst signal.

상세한 측정점과 도플러 신호와의 관계를 설명하기 위하여 측정체적(레이저 교차부)을 확대한 그림을 Fig. 4에 나타내었다. 측정체적에는 입사 레이저 파면의 간섭에 의해 수평방향으로 명암의 간섭 줄무늬(fringe)가 형성된다. 이 간섭 줄무늬의 간격(δ)은 레이저의 파장 및 2개의 레이저의 교차 각도에 의해 기하학적으로 결정된다. 한편, 도플러 신호의 산 부분은 간섭 줄무늬의 밝은 부분에 해당하기 때문에 이 산과 산의 간격($\Delta t = 1/f_d$)을 구하는 것에 의해 입자속도를 측정할 수 있다. 다시 말해 입자속도 V 는 이하의 식으로 주어진다(Hwang, 2005; Durst 등, 1976).

$$V = \delta_f \times f_d = \delta_f / \Delta t \quad (1)$$

본 연구에 이용한 LDV는 수광계가 레이저 측에 있는 후방 산란형(Hinsch, 1993; Morikita 등, 1994)이다. 광원은 멀티라인(multi line)의 Ar^+ 레이저(NEC, GLG3282)이며 컬러 버스터(color burst)라고 불리는 분광계(TSI, 9210)에 의해 2차원 계측용으로 분광(파장 514.5 nm와 488 nm) 된다. 각각의 레이저는 광 화이버(optical fiber)에 의해 송광계로 보내어진 후에 송광계 내에서 각각 이분할(파장 514.5 nm 2개, 파장 488 nm 2개)되며, 그 중 한쪽은 유동의 방향을 결정하기 위하여 음향 광학소자에 의해 1MHz(514.5 nm)와 500kHz(488 nm)의 주파수 변조를 받는다. 송광계로부터 사출된 레이저는 초점위치에서 교차하여 측정점

을 형성한다. 측정점을 통과하는 입자로부터의 산란 광은 레이저 측에 설치된 송광렌즈를 겸하는 수광렌즈에 의해 검지되며 그 신호는 컬러링크(color link)라고 하는 수광 시스템(TSI, 9230)과 신호처리기(TSI, IFA655)에서 처리되어진 후 퍼스널 컴퓨터(PC)에서 속도 데이터로 변환된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탈질촉매 내 열화특성

탈질촉매의 열화특성을 평가하기 위하여 100,000 시간 사용된 촉매표면의 TiO_2 , CaO , SO_3 및 SiO_2 의 질량분율을 측정하였다. 여기서, TiO_2 는 촉매의 주성분이며 CaO , SO_3 및 SiO_2 는 재 입자 성분이다. Fig. 5에 주류(z) 방향에 대한 촉매표면의 TiO_2 , CaO , SO_3 및 SiO_2 의 질량분율 분포를 나타내었다. 그 결과 입구 근처($z=0$ mm)에서의 TiO_2 질량분율은 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있으나, CaO , SO_3 및 SiO_2 의 질량분율은 최대값을 나타내고 있다. 그러나 하류로 감에 따라 TiO_2 의 질량분율은 증가함에 반해 CaO , SO_3 및 SiO_2 의 질량분율은 상류영역($0 \leq z \leq 300$ mm)에서 감소하며 중·하류영역($z > 300$ mm)에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 부착된 재 입자에 의해 탈질촉매 입구근처의 표면이 완전히 덮어졌으며 이러한 재 입자의 부착은 하류를 향할수록 억제되어지고 있음을 나타낸다.

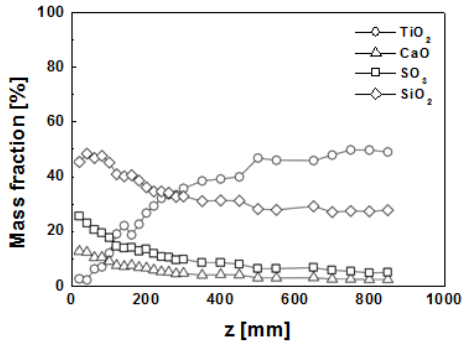


Fig. 5. Streamwise distributions of TiO_2 , CaO , SO_3 and SiO_2 mass fraction on the catalyst surface.

Fig. 6에는 100,000 시간 입구와 출구에서 사용된 촉매와 새 촉매에 대한 탈질효율 결과를 나타내었다. 그 결과 새 촉매, 입구 및 출구에서 사용된 촉매의 탈질효율은 각각 0.68, 0.42 및 0.56으로 나타났다. 입구 및 출구에서 사용된 촉매의 탈질효율 값은 비록 새 촉매 보다 낮지만, 새 촉매와 출구에서 사용된 촉매의 탈질효율 차이는 입구에서 사용된 촉매와 출구에서 사용된 촉매의 탈질효율 차이보다 더 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 탈질촉매 입구근처의 상류영역이 하류 영역과 비교하여 열화가 현저하며 그와 같은 국지적인 열화는 탈질촉매 총 성능을 감소시키는 것을 의미한다.

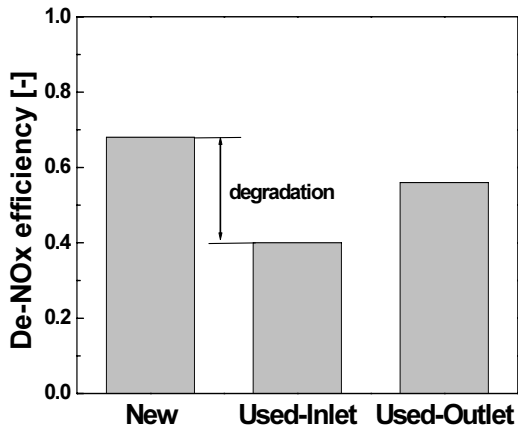
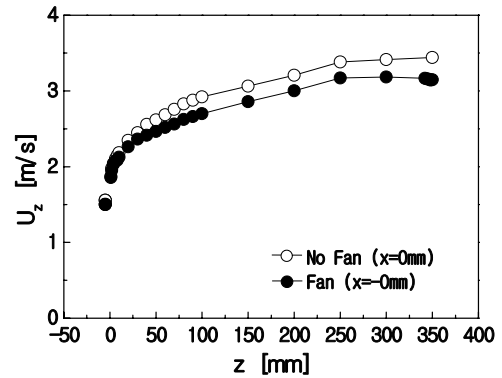


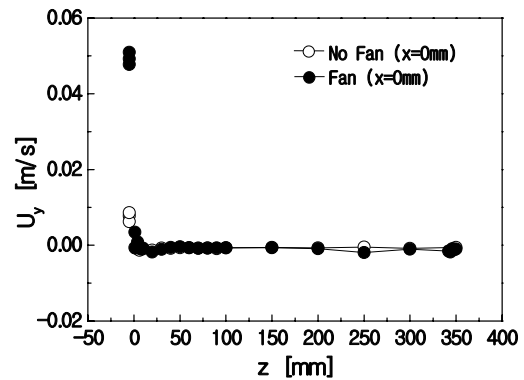
Fig. 6. De-NOx efficiency for new and two used (Used-Inlet and Used-Outlet) catalysts.

3.2. 탈질촉매 내 유동상태 평가

Fig. 7, 8에 모의촉매 내부에 있어서 주류(z) 및 연직(y) 방향의 평균유속 (U_z , U_y)과 난류강도 ($U_{z,rms}$, $U_{y,rms}$)의 주류(z)방향 분포를 나타내었다($Re=1000$). 결과로부터 회전날개의 유무에 관계없이 촉매 내부에 있어서 U_z 는 단조롭게 증가하며 U_y 는 0 m/s의 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 $U_{y,rms}$ 도 회전날개의 유무에 관계없이 0 m/s의 분포를 나타내지만 회전날개가 존재하는 경우의 $U_{z,rms}$ 는 존재하지 않는 경우에 비하여 약 50% 정도의 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 촉매 상류부에 있어서 현저했던

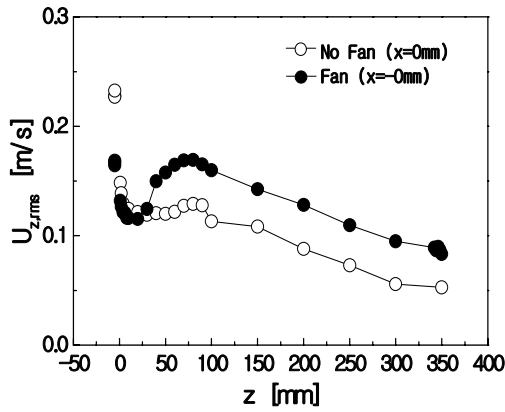


(a) Axial mean flow velocity

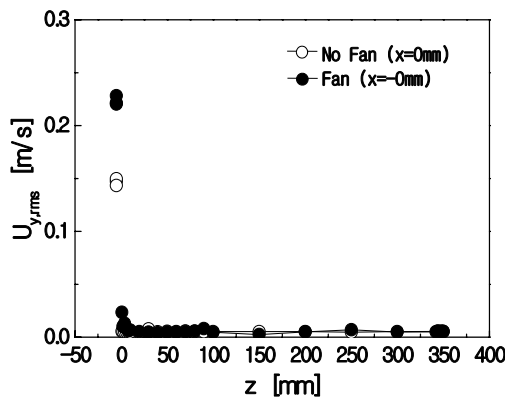


(b) Vertical mean flow velocity

Fig. 7. Influence of fan on axial(z) and vertical(y) mean flow velocity (U_z , U_y) inside catalyst ($Re=1000$).



(a) Axial rms flow velocity



(b) Vertical rms flow velocity

Fig. 8. Influence of fan on axial(z) distribution of axial(z) and vertical(y) rms flow velocity ($U_{z,rms}$, $U_{y,rms}$) inside catalyst (Re=1000).

연직(y) 방향 및 반경(x) 방향의 난류가 촉매 내부에 유입함으로써 촉매격자의 영향을 받아 선회류가 점점 소멸함과 동시에 주류(z) 방향으로 변환되었기 때문이라고 생각된다. 게다가 회전날개의 유무에 관계없이 $U_{z,rms}$ 는 하류로 감에 따라 단조롭게 감소하며 그 감소 경향은 회전날개가 존재하지 않는 경우의 쪽이 더 빠른 것을 볼 수 있다. 이것은 촉매 내부에 유입한 난류가 급격히 약해져 층류로 천이하고 있으며 회전날개

가 존재하지 않는 경우의 층류 천이가 보다 빠르다는 것을 나타낸다. 또한 회전날개가 존재하지 않는 경우의 U_z 가 존재하는 경우와 비교하여 높은 값을 나타내고 있는 것은 보다 빠르게 층류 유속분포인 포물선 분포에 근접하기 때문이라고 생각된다. 한편 회전날개가 존재하는 경우의 $U_{z,rms}$ 는 촉매 입구 직후에서 한번 저하한 후 다시 상승하는 거동을 보이고 있는데 이것은 촉매 전후에서 유속분포가 급격하게 변화되기 때문에 그것에 따른 난류의 생성이 억제되기 때문이다(Kurose 등, 2006; Tanno 등, 2009; Kubota 등, 2006).

Fig. 9에 난류에너지(E)의 주류(z) 방향 분포를 나타내었다(Re=1000). 여기서, 난류에너지(E)는 주류(z), 연직(y) 및 반경(x) 세 방향의 속도변동 제곱의 평균값의 합이며 $E = U_{z,rms}^2 + U_{y,rms}^2 + U_{x,rms}^2$ 로 주어진다. 앞서 서술하였듯이 본 계측에서는 2차원의 LDV를 사용하였기 때문에 E 의 산출에 있어서 반경(x) 방향의 속도변동은 $U_{y,rms} = U_{x,rms}$ 로 가정하였다. E 는 $U_{z,rms}$ 와 같이 회전날개가 존재할 경우가 존재하지 않는 경우에 비하여 약 50% 정도 높은 상태를 유지하면서 하류로 감에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 회전날개에 의해 만들어진 난류가 촉매부에 유입 후에도 존재하는 것으로 이 난류가 촉매 내에서 급격히 약해져 층류로 천이하는 것으로 생각된다.

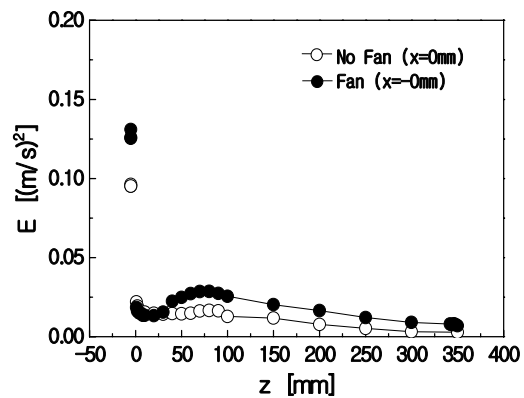
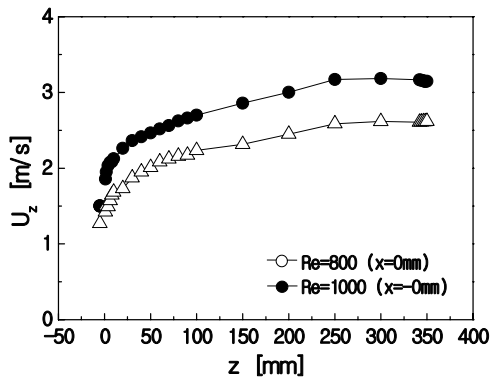
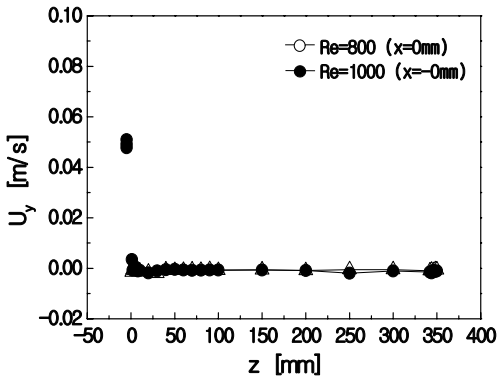


Fig. 9. Influence of fan on axial(z) distribution of turbulence energy(E) (Re=1000).

Fig. 10, 11에 레이놀즈 수(Re)에 따른 모의촉매 내부의 주류(z) 및 연직(y) 방향의 평균유속(U_z , U_y)과 난류강도($U_{z,rms}$, $U_{y,rms}$)의 주류(z) 방향 분포를 나타내었다. Fig. 12에는 난류에너지 (E)의 주류(z) 방향 분포를 나타내었다. 결과로부터 모의촉매 내 가스유량의 감소, 즉 Re 수의 저하에 따라 U_z , $U_{z,rms}$, 및 E 는 전영역에서 저하하는 것을 알 수 있다. 또한, 촉매 내에서 유동상태가 난류로부터 층류로 천이하는 위치도 상류측으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

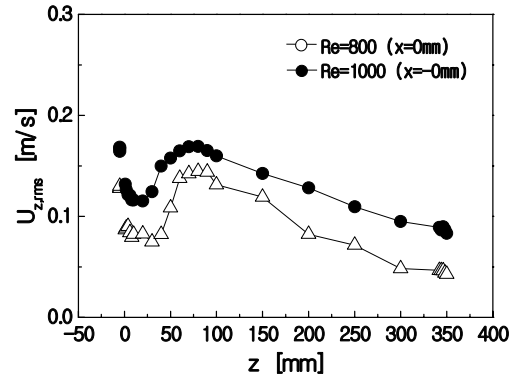


(a) Axial mean flow velocity

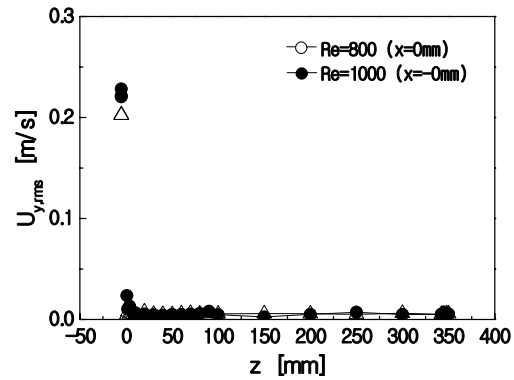


(b) Vertical mean flow velocity

Fig. 10. Influence of Reynolds number on axial(z) and vertical(y) mean flow velocity(U_z , U_y) inside catalyst.



(a) Axial rms flow velocity



(b) Vertical rms flow velocity

Fig. 11. Influence of Reynolds number on axial(z) and vertical(y) rms flow velocity($U_{z,rms}$, $U_{y,rms}$) inside catalyst.

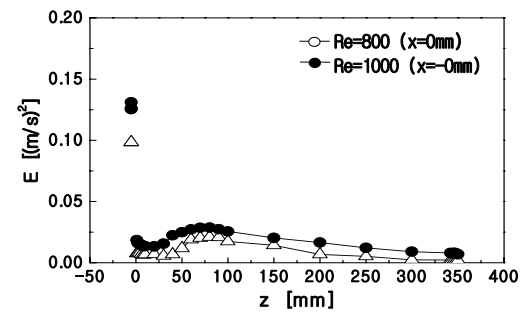


Fig. 12. Influence of Reynolds number on axial(z) distribution of turbulence energy(E).

3.3. 탈질촉매 내 열화특성과 유동상태 관계

이상의 결과로부터 탈질촉매 내 열화특성과 유동상태 관계에 대하여 난류로부터 층류로 천이하는 촉매 내 유동특성에 의해 탈질촉매의 입구 근처에서만 열화가 현저하게 발생된다고 요약할 수 있다(Kurose 등, 2006, 2007). 이는 탈질촉매 입구 근처 상류영역에서의 유동이 난류이기 때문에 그와 같은 무질서한 유체운동이 재 입자를 촉매표면으로 빈번하게 이동시키며 촉매표면에 부착되도록 촉진시킨다. 따라서 촉매표면은 재 입자에 의해 덮어지며 탈질촉매의 국지적인 열화는 입구 근처에서만 발생되어진다. 그러나 하류로 갈수록 내부유동이 난류에서 층류로 천이되어지고 유체운동이 완만해지면서 재 입자의 부착이 억제되어진다. 그 결과로서 중·하류 영역에서 탈질촉매의 열화는 감소되어진다. 또한 탈질촉매의 상류영역과 하류영역 사이의 재 입자의 농도차로 인해 하류영역에서의 재 입자의 부착은 더욱 감소된다. 그러나 거의 모든 재 입자들이 전기집진기(ESP)에서 포집되어지기 때문에 촉매표면에 부착되는 재입자의 양은 배기가스 내 재 입자의 총량과 비교하여 매우 적다. 따라서 탈질촉매의 국지적 열화는 재 입자의 농도차에 기인하는 것이 아니라 오히려 난류로부터 층류로 천이되어지는 내부유동에 의한 것이라고 생각할 수 있다. 이러한 결과는 Tanno 등의 연구결과(Tanno 등, 2009)를 통해서도 알 수 있다. Tanno 등은 표면반응에 따른 유로 내 흐름에 대하여 LES(large-eddy simulation)을 실시하여 층류를 유입시키는 경우에 비하여 발달된 난류를 유입시키는 경우가 표면반응 속도가 빠르고 난류가 유로 벽면에 있어서 표면반응을 촉진시키고 있다고 나타내고 있다.

4. 결론

탈질촉매 내 열화특성과 내부 유동상태에 대하여 실험적으로 고찰하였으며, 촉매 내 열화특성과 유동상태 사이의 간접적인 상관관계에 대해 알아보았다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 탈질촉매 내 유동상태는 난류로부터 층류로 천이하며 탈질촉매의 열화는 내부 유동, 즉 난류-층류 천이에 의해 현저하게 영향을 받는다.

2. 탈질촉매 내 유입된 난류가 재 입자를 촉진시켜 촉매표면에 부착하기 때문에 촉매의 국지적 열화는 입구근처 상류영역에서 현저하다. 또한 이와 같은 열화는 탈질촉매의 총효율을 지배한다.

3. 탈질촉매에 부착된 재 입자의 양은 하류로 갈수록 감소하며 이것은 난류로부터 층류로 내부 유동이 천이하기 때문이다. 또한 난류변동이 없는 흐름은 재 입자를 거의 이동시키지 않기 때문에 층류영역에서의 촉매표면의 재 입자 부착은 억제된다.

본 실험 결과를 근거로 하여 향후 유동변화에 따른 열화특성에 대한 직접적인 상관관계와 영향 등에 대한 더 상세한 결과 및 고찰이 필요하다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비(2009-0139) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- 홍성호, 2007, 탈질촉매 기술동향, 세라미스트, 10(1), 53-64.
- Durst, F., Melling, A., Whitelaw, J. H., 1976, Principle and practice of laser-Doppler anemometry, Academic Press, London, 58-96.
- Hinsch, K. D., 1993, Three-dimensional particle velocimetry, Measurement Science and Technology, 6, 742-753.
- Hwang, S. M., 2005, A Study on Flame Structure of Multi-Phase Combustion by Optical Measurement, Ph. D Dissertation, Osaka University, Osaka, Japan.
- Komori, S., Ueda, H., Ogino, F., Mizushima, T., 1982, Turbulence Structure and Transport Mechanism at the Free Surface in an Open Channel Flow, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 25(4), 513-521.
- Kubota, Y., Kurose, R., Komori, S., 2006, Direct Numerical Simulation of Turbulent-Laminar Transition, Trans. Jap. Soc. of Fluid Mechanics, CD-ROM.
- Kurose, R., Makino, H., Shimada, H., Hikino, K., 2006, Effect of Flow Behavior on Degradation of De-NOx Catalyst, Trans. J. of the Jap. Institute of Energy, 85(6), 471-474.

- Kurose, R., Michioka, T., Makino, H., Komori, S., 2007, Effect of Flow Behavior in De-NO_x Catalyst Honeycomb on Adhesion of Particles to the Wall, Trans. Jap. Soc. of Powder Technology, 85(6), 471-474.
- Morikita, H., Hishida, K., Maeda, M., 1994, Measurement of size and velocity of arbitrary shaped particles by LDV based image technique, 7th Intern. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, paper 24. 7.
- Tanno, K., Kurose, R., Makino, H., Komori, S., 2009, Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow with Surface Reaction in a Square Duct, Trans. Jap. Soc. of Fluid Mechanics, CD-ROM.