

## 경유차 배기가스 저감용 원심유동층 촉매반응장치의 유동특성에 관한 연구

이관석<sup>1</sup>\*, 금성민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>한라대학교 기계자동차공학부

### A study on the fluidization of centrifugal fluidized bed for reduction of exhaust gas from diesel powered vehicle

Kwan-Seok Rhee<sup>1</sup>\*, Sung-Min Kum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical and Automotive, Kongju National University

<sup>2</sup>School of Mechanical & Automotive engineering, Halla University

**요약** 경유자동차의 질소산화물을 저감하기 위한 원심유동층장치를 개발하기 위해, 가스분산관 내경 184mm, 폭 50mm의 원심유동층장치에서 평균입자직경 26 $\mu$ m, 32 $\mu$ m의 Cu-ZSM-5 제올라이트 촉매를 유동입자로 사용하여 원심유동층의 유동특성을 조사한 결과, 원심유동층내의 기포직경은 거의 0.3~3.0mm의 작은 범위이며, 기포의 상승속도는 기포직경 및 가스속도와 상관없이 0.0~0.4m/s 정도이다. 또한 원심유동층에서 사용가능한 평균입자 직경은 60 $\mu$ m이며, 층내에서 기체와 고체의 접촉은 양호한 것으로 조사되었다.

**Abstract** The characteristics of fluidization in a centrifugal fluidized bed with a 184 mm inner diameter, 50 mm width of the gas distributor was observed by photographs and experimental works using Cu-ZSM-5 zeolite catalysts with a mean diameter of 26 $\mu$ m and 32 $\mu$ m as bed materials at a rotor at 400rpm and 600rpm. Under these experimental ranges, the experimental results clearly showed the effects of the number of rotation of the rotor on the behavior of bubbles in the centrifugal fluidized bed. As the number of rotations of the rotor increased, the gas velocity at which bubbles begin to be formed also increased but the diameter of the bubbles decreased. In addition, the size of the bubbles in the centrifugal fluidized bed were relatively smaller than those in the conventional bubbling fluidized bed.

**Keywords** : Centrifugal fluidized bed, Diesel engine, Exhaust gas, Fluidization, Zeolite catalyst,

#### 1. 서론

2015년 9월 폭스바겐 자동차가 질소산화물 포집장치(NSC ; NO<sub>x</sub> Storage Catalyst)를 조작하기 위한 소프트웨어를 장착했다는 보도가 우리 모두를 놀라게 하였으며, 그 규모도 1100만 대에 이를 것이라는 보도가 계속되고 있다. 이 보도는 해당 차량의 연비가 광고한 수준보다 18%나 떨어진다는 충격적인 사실이다. 이에 한국

정부 공정위측도 폭스바겐 자동차의 배출가스 조작과 관련하여 허위, 과장 광고 실태를 조사한다고 발표하였다.

값이 비교적 저렴한 경유를 사용하는 디젤엔진은 열효율이 높고 용량의 대형화가 가능하기 때문에 자동차나 선박 등의 수송기관과 발전용으로 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 디젤엔진의 배기가스 중에는 고농도의 질소산화물과 매연, 그리고 미립의 부유입자물질이 다량 함유되어 있기 때문에 도시형 대기오염의 주범으로 알려

\*Corresponding Author : Kwan-Seok Rhee(rhee@kongju.ac.kr)

Tel: +82-10-8816-1507 email: rhee@kongju.ac.kr

Received December 7, 2015

Revised (1st December 28, 2015, 2nd January 13, 2016)

Accepted February 4, 2016

Published February 29, 2016

져 있다. 따라서 Euro-5 규제에 대응하기 위해 자동차회사들의 기술개발이 꾸준히 진행되고 있다.

원심유동층은 중력장의 유동층에 비해 유동화 기체의 유량을 크게 할 수 있기 때문에 처리능력을 크게 할 수 있으며, 용기의 회전수를 증가시킴으로써 유동층 조작 및 제어가 용이하다는 특징을 갖고 있다. 따라서 장치의 콤팩트화가 가능하기 때문에 자동차나 선박 등에 탑재가 용이하다.

Cu-ZSM-5 제오라이트 촉매가 산소분위기 하에서 높은 NO<sub>x</sub> 분해능이 발견되었다는 연구 보고가 있었다[1, 2] 실제로 경유차의 배기가스 분위기에서 Cu-ZSM-5 제오라이트 촉매는 NO<sub>x</sub> 분해에 어느 정도의 효과가 있지만 여러 가지 반응기구 등은 아직 명확하지 않다.

디젤엔진 배기가스 조성은, NO<sub>x</sub> : 600~1600ppm, O<sub>2</sub> : 10~14%, CO : 1000ppm, SO<sub>x</sub> : 50~500ppm, CO<sub>2</sub> : 5~8%, H<sub>2</sub>O : 5~9%이고 배기가스 온도는 250~550 °C인 것으로 조사되었다.

Pfeffer 등[3]은 원심유동층에서 숯검댕이(soots)의 포집이 가능하다고 이미 보고한 바 있으며, 원심유동층에서의 유동화에 대한 연구도 진행되고 있다[4].

따라서 본 연구에서는 경유자동차의 질소산화물을 저감시킬 수 있는 원심유동층장치를 개발하기 위하여, 유동입자로서 Cu-ZSM-5 제오라이트 촉매를 사용하는 원심유동층의 유동특성을 규명하고 최소유동화속도를 구하며, 기포 직경을 조사하여 층 내에서 기체와 고체의 접촉상태를 조사하고자 한다. 아울러 유동입자의 적용범위도 결정하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig.1은 원심유동층의 유동특성을 조사하기 위한 실험장치의 개략도이며, Fig.2는 회전 부를 나타낸 그림이다.

Rotor와 Plenum chamber는 스테인리스로 제작하였으며 가스 분산관은 내경 184mm, 두께 3mm, 폭 50mm의 원통형 스테인리스 소결관을 사용하였다.

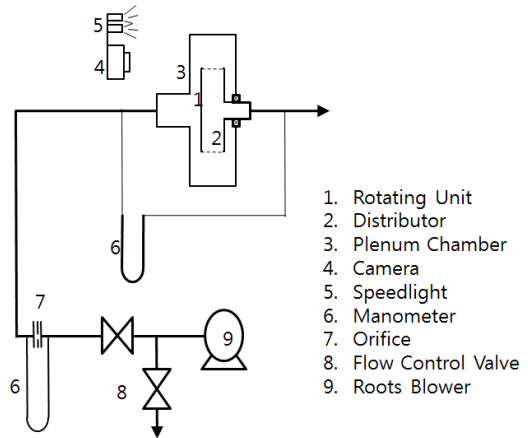


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

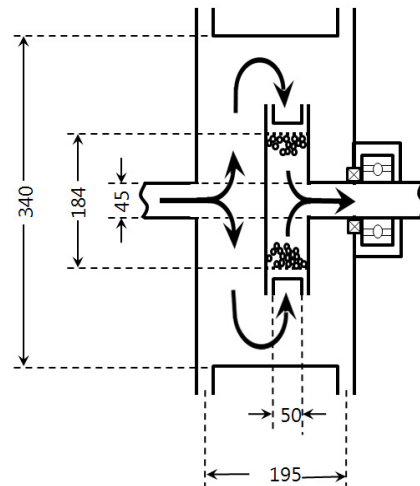


Fig. 2. Diagram of rotating unit

Table 1. Properties of Cu-ZSM-5 zeolite catalysts

dp [μm]	SiO <sub>2</sub> [wt%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [wt%]	Na <sub>2</sub> O [wt%]	CuO [wt%]
26	84.7	4.9	1.3	3.2
32	89.3	3.2	1.0	2.8

Table1은 본 실험의 유동입자로 사용한 제오라이트 촉매의 사양을 나타낸 것이다.

기포의 거동은 2개의 후래시를 일정시간의 간격으로 발광하여 기포 직경 및 상승속도를 사진으로부터 구하였다.

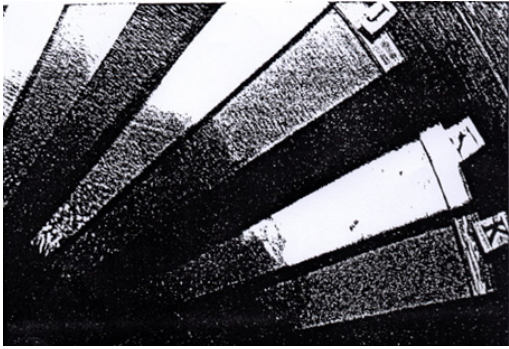


Fig. 3. Photographs

### 2.2 실험방법

로터는 진동기에 의해서 회전시키고 인버터로 회전수를 제어 하였다. 가스 분산판의 유속은 Orifice manometer에 의해 제어하였으며, 촉매 300g을 로터 내에 넣고 400rpm과 600rpm으로 실험하였다. 실험에 사용한 카메라는 Nikon F4이고 셔터 스피드는 1/125이다. 두 개의 Speed light의 발광간격은 0.0035sec 이다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 최소유동화 속도

층 전체에 유동화가 일어나기 시작하는 최소유동화 속도는 Ergun[5] 식을 사용하여 구하였다.

$$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} d_p^{1.82} (\rho_p - \rho_f)^{0.94} g}{\rho_f^{0.06} \mu^{0.88}} \quad (3-1)$$

- $d_p$  : Particle diameter (mm)
- $g$  : Gravitational acceleration ( $m/s^2$ )
- $\rho_f$  : Fluid density ( $kg/m^3$ )
- $\rho_p$  : Particle density ( $kg/m^3$ )
- $\mu$  : Fluid viscosity ( $kg\cdot s/m^2$ )

유동층의 압력손실과 분산판의 가스속도의 관계를 그림으로 나타내어 그로부터 최소유동화 속도를 구할 수 있다.

Rotor의 회전수 400rpm, 촉매입경 26 $\mu m$ , 촉매량 300g, 정지층 높이 12.0mm의 경우, 유동화 개시속도의 계산치는 0.018m/s이고 실험치는 0.02m/s이기 때문에 실험치와 계산치는 거의 일치한다. 실험결과를 Fig.4와 Fig.5에

나타내었다. 실험결과에서 보는 바와 같이 최소유동화 속도 이후 가스속도를 증가시켜도 더 이상의 압력손실은 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

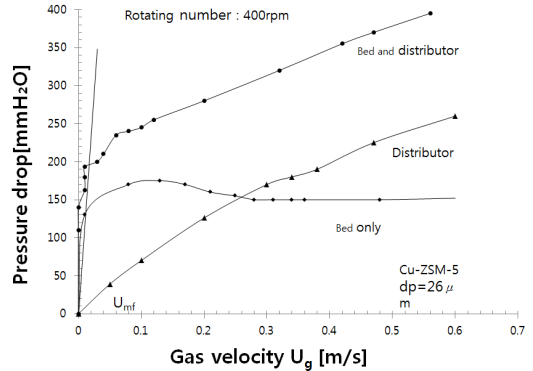


Fig. 4. Pressure drop profile of centrifugal fluidized bed

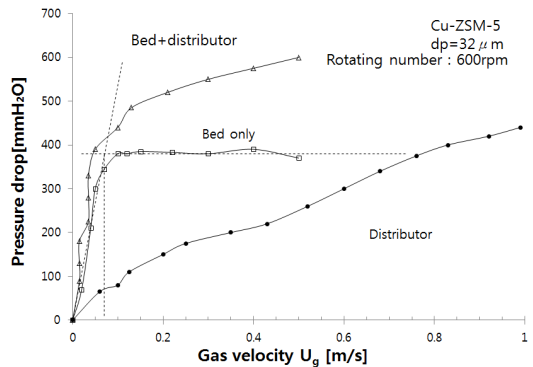


Fig. 5. Pressure drop profile of centrifugal fluidized bed

### 3.2 입자의 비산속도

원심력장에서 입자의 종말속도  $U_t$ 는 다음 식으로 구하였다[6].

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \frac{d_p (U_r^2 / r)}{C_D}} \quad (3-2)$$

- $U_r$  : Superficial fluid velocity(m/s)
- $r$  : Radius (mm)
- $C_D$  : Resistance coefficient (-)

### 3.3 층 내 기포직경

이중 노출 사진에서 얻은 기포의 직경  $D_b$ 를 실측하였다.

$$D_b = (L+b)/2 \quad (3-3)$$

L : 기포의 장경 (mm)

b : 기포의 단경(mm)

기포직경의 분포도를 Fig.6 및 Fig.7에 나타내었다. Fig.6은 유동화 초기에서의 실험 결과이며, Fig.7은 유동화 안정 이후의 실험 결과이다.

이들 그림에서 보는 바와 같이 기포직경은 0.3mm~3.0mm 범위였으며, 직경 0.5mm 기포의 발생빈도 수가 가장 많은 것으로 나타나 원심유동층 내에서의 기체와 고체의 접촉은 양호한 것으로 사료된다.

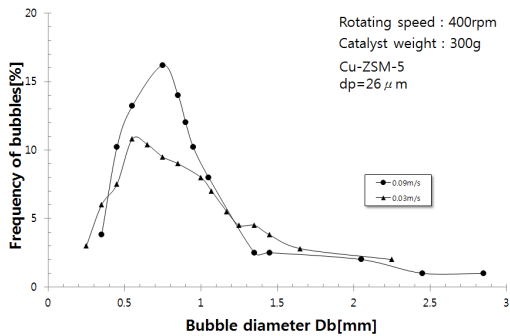


Fig. 6. The frequency profile of bubbles diameter in centrifugal fluidized bed

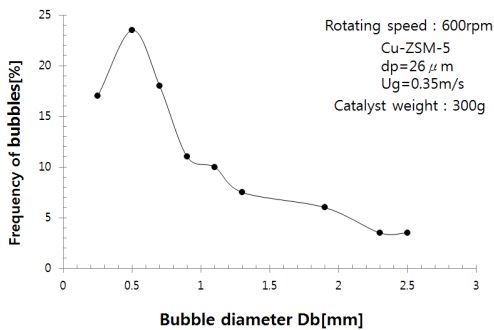


Fig. 7. The frequency profile of bubbles diameter in centrifugal fluidized bed

### 3.4 기포의 상승속도

이중 노출 사진에 의해서 0.0035sec의 간격에 상승하는 두 개의 기포를 얻어 기포의 상승거리 H를 측정하여 기포의 상승속도 V를 구하였다.

$$V = H/0.0035 \quad (\text{m/s}) \quad (3-4)$$

Fig.8, 9, 10에서 보는 바와 같이 기포의 상승속도는 기포직경 및 가스속도와는 관계없이 거의 0.0 m/s ~ 0.4m/s 정도 상승하는 것으로 나타났다.

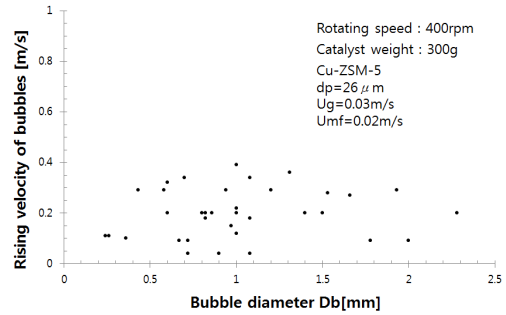


Fig. 8. The rising velocity of bubbles in centrifugal fluidized bed

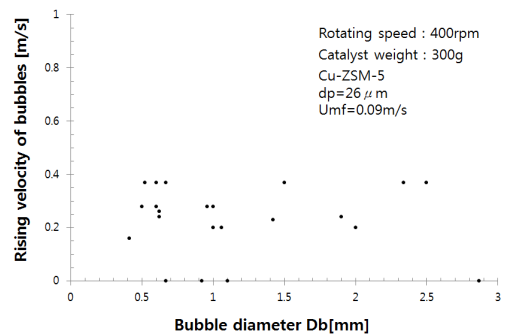


Fig. 9. The rising velocity of bubbles in centrifugal fluidized bed

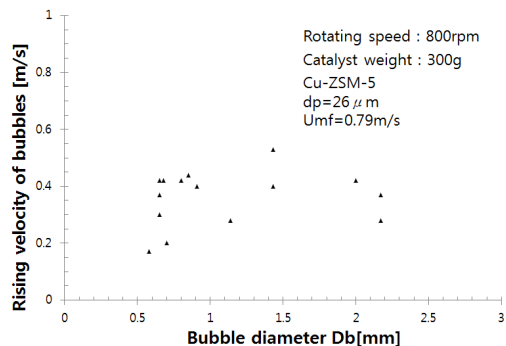


Fig. 10. The rising velocity of bubbles in centrifugal fluidized bed

### 3.5 입자의 적용범위

미세입자를 유동화 시킬 수 있는 원심유동층장치에서

[7] 26 $\mu\text{m}$ 와 32 $\mu\text{m}$ 의 입자직경에 대한 실험 후 입자의 직경을 측정된 결과, 평균 입자 직경은 45 $\mu\text{m}$ ~60 $\mu\text{m}$ 의 범위였다. 이러한 결과는 60 $\mu\text{m}$ 까지의 입자직경은 유동 특성상 거의 같은 결과를 예상할 수 있다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가스분산관 내경 184mm, 폭 50mm의 원심유동층장치에서 평균입자직경 26 $\mu\text{m}$ , 32 $\mu\text{m}$ 의 Cu-ZSM-5 제오라이트 촉매를 유동입자로 사용하여 원심유동층의 유동특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원심유동층내의 기포직경은 작은 편이며, 거의 0.3~3.0mm의 범위이다.
- (2) 기포의 상승속도는 기포직경 및 가스속도와 상관없이 0.0~0.4m/s 정도이다.
- (3) 이상의 결과로부터 원심유동층에서 사용가능한 평균입자 직경은 60 $\mu\text{m}$  이며, 층 내에서 기체와 고체의 접촉은 양호하다.

따라서 향후 고온실험연구를 통하여 원심유동층 장치에서의 질소산화물 저감이 가능할 것으로 사료된다.

#### References

- [1] M. Iwamoto, H. Yahiro, Y. Mine, S. Kagawa, Chem., Lett., pp.213, 1989.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1246/cl.1989.213>
- [2] S. Sourirajan, J. L. Blumental, Proc., Intern., Congr., on Catalyst, Paris,2, 2521, 1969.
- [3] Robert Pfeffer, Gabriel I.Tardos, Fluidization V. Elsinore, pp. 18~23, 1986.
- [4] Kwan-Seok Rhee and Sung-Min Kum, "Bubble Behavior in Centrifugal Fluidized Bed of Fine Particles", J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 10, No. 7 pp. 1446-1452, 2009.
- [5] Freek Kapteijn, J. of Chemical Society, Chem., Commun., pp. 1085-1086, 1984.
- [6] T. Takahashi., Chemical Eng. of Japan, pp.32-38, November 1986.
- [7] K.S.Rhee, B.R.Jang, "Effect of NOx reduction on the particle size in centrifugal fluidized - bed" J. of Korea industrial technology society, pp.75-78, Dec. 2005

이 관 석(Kwan-Seok Rhee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1987년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

De-NOx, 경유차 PM

금 성 민(Sung-Min Kum)

[정회원]



- 1994년 8월 : 인하대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 한라대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

열전달, 공기조화, 신재생 에너지