

변형구조의 사이클론 집진기에서 분진의 집진 및 혼합특성 연구

강순국^{1*}

¹선문대학교 환경공학과

A Study for Collection and Mixing Characteristics of Particles in a Modified Cyclone Particle Collector

Soon-Kook Kang^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Sunmoon University

요 약 일반과 변형구조의 사이클론에서 입자흐름의 체류시간분포 특성을 통해 선회강도, 난류성 에디, 벽면 바운싱에 의한 고체흐름의 역혼합과 2단 선회류 약화기의 직경이 집진효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 변형구조 사이클론(S = 13, 15cm)에서 플라이애쉬의 집진효율이 일반 사이클론보다 높게 나타났다. 변형구조의 사이클론에서 집진효율은 2단 선회류 약화기의 직경(S)이 13cm에서 가장 높게 나타내었다. 글라스비드의 체류시간분포에 대한 분산과 평균 체류시간은 선회강도와 난류성 에디로 인해서 2단 선회류 약화기의 직경이 증가할수록 증가하였다. 변형구조의 사이클론에서 고체 흐름의 역혼합은 기체 유입속도가 증가할수록 증가하였고 일반 사이클론보다 높게 나타났다.

Abstract The effect on collection efficiency with 2-stage vortex finder diameter and back mixing of solid flow due to swirling intensity, turbulence eddies, wall bouncing using the residence time distribution of particle flow in a common and modified cyclone. Higher collection efficiencies of fly ash in a modified cyclone(S = 13, 15cm) are showed than common cyclone. Collection efficiency in modified cyclone was highest at 2-stage vortex finder diameter, S = 13 cm. Variances of residence time distribution and average residence times of glass bead were increased with a diameter(S) of 2-stage vortex finder due to swirling intensity and turbulence eddies. Back mixing of solid flow in a modified cyclone were increased with a gas inlet velocity and showed higher than a common cyclone.

Key Words : Back-mixing, Collection-efficiency, Modified-cyclone, Solid-residence-time-distribution

1. 서론

사이클론 집진기에서 가스흐름은 외부선회류와 내부 선회류로 구성되어 있다. 외부선회류 영역은 입자상물질이 집진되는 영역이며, 내부선회류 영역은 입자상 물질의 집진후 정화gas가 밖으로 배출되는 영역으로 고려할 수 있다. 이런 외부선회류와 내부선회류를 갖는 가스흐름은 원심력집진기의 기하치수비에 의존하는데 일반적으로 회전방향은 변하지 않으며 집진기의 일정영역에서 벌크 기체흐름이 외부선회류에서 내부선회류로 변하여 원심력집진기의 출구로 배출된다[1]. 이러한 선회류약화기의 길이가 길어지면 사이클론 집진기 하단의 포집분진함 부분에

서 외부선회류의 방향이 바뀌게 되고, 선회류약화기의 길이가 짧으면 몸통부분에서 선회류의 방향이 바뀐다. 그러므로 이러한 선회류약화기의 크기에 대한 설정은 매우 신중하게 이루어져야 한다. 대부분의 원심력집진기의 경우 원추부분 상부의 2/3 지점에서 선회류의 방향이 바뀌도록 설계를 하게 된다.

사이클론 집진기에서 입자상물질은 선회류운동에 의하여 발생하는 분진 입자의 원심력에 의하여 이루어지게 된다. 선회류운동시 발생하는 입자의 원심력은 분진입자를 몸통 벽면의 경계층 내로 이동시키게 되고 경계층 내에 존재하는 항력과 입자-벽면과의 기계적 마찰에 의하여 분진입자는 관성력을 잃고 중력에 의하여 제거되게

*Corresponding Author : Soon-Kook Kang (Sunmoon University)

Tel: +82-41-530-2382 email: kskang@sunmoon.ac.kr

Received November 28, 2012 Revised December 24, 2012 Accepted January 10, 2013

된다. 이러한 분진제거 메커니즘에는 분진입자의 직경, 밀도, 가스의 점도와 같은 물질특성인자 뿐만 아니라 분진입자의 가스 내 혼합특성에도 영향을 받게 된다. 그러므로 원심력집진기의 집진특성을 유도하기 위해서는 집진기 내에서의 분진의 체류특성과 혼합특성과 같은 기-고체 흐름에 대한 정보를 필요로 하게 된다[2].

본 연구에서는 2단 선회류 약화기의 설치와 직경이 싸이클론 집진기의 집진성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 또한 상업용과 2단 선회류 약화기를 갖는 변형구조 싸이클론에서 입자흐름의 체류시간분포 특성을 통해 선회강도, 난류성 에디, 벽면 바운싱에 의한 고체흐름의 역혼합이 집진효율에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 이론적 배경실험

2.1 집진효율식 및 계산

Leith and Licht는 부유분진의 역혼합과 기체 흐름의 비이상성을 고려하여 싸이클론 집진기에서 기체흐름 평균 체류시간과 분진의 부분 집진효율을 식(1)과 식(2)로 나타내었다[3].

$$\tau_g = \frac{1}{Q_g} \left(V_s + \frac{V_{nl}}{2} \right) \quad (1)$$

$$\eta_i = 1 - \exp\{-2(C\psi_i)^{1/(2n+2)}\} \quad (2)$$

여기서 τ_g 와 Q_g 는 각각 기체흐름의 평균 체류시간과 부피 유속이고, V_s 와 V_{nl} 은 각각 몸통부와 원추부의 부피이다. 또한 C , ψ_i 와 n 은 각각 기하치수 요인, 관성력 요인과 난류지수를 나타낸다. 이들의 부분 집진효율식은 외부 선회류에서 내부 선회류로의 역혼합과 벽면 바운싱이나 분진입자의 농도 효과를 반영하지 못하고 있다. Dietz는 해석적 모델인 부부 집진효율식(식 3)을 제안하였다[4].

$$\eta = 1 - \left\{ K_0 - (K_1^2 + K_2)^{1/2} \right\} e^{\left(\frac{-D_c \pi U D_c}{Q_g} \right)} \quad (3)$$

여기서 K_0 , K_1 과 K_2 는 중간변수들이고, D_c , U 와 D_c 는 각각 몸통경, 분진의 벽면 유속과 기하치수 함수이다.

실험적으로 구한 전체 집진효율과 입구 및 출구에서 측정된 입경분포를 이용하여 원심력집진기의 부분집진효

율을 구할 수 있다. 원심력 집진기의 입구, 출구와 포집분진함에 대한 분진의 전체 물질수지는 다음과 같다[5].

$$W_i = W_c + W_o \quad (4)$$

여기서 W_i , W_c 와 W_o 는 각각 유입 분진량, 집진된 분진량과 포집되지 않은 분진량이다. 또한 입경크기 x 에 대한 물질수지도 같은 방식으로 나타낼 수 있다.

$$(W_i)_x = (W_c)_x + (W_o)_x \quad (5)$$

그러므로 입경 x 에 대한 부분 집진효율은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_x = \frac{(W_c)_x}{(W_i)_x} = \frac{W_c}{W_i} \frac{(dF_c/dx)}{(dF_i/dx)} = \eta \frac{dF_c}{dF_i} \quad (6)$$

여기서 F_c 와 F_i 는 각각 유입 분진과 포집 분진의 누적분율을 나타낸다.

2.1 모멘텀과 축방향 분산모델

폐쇄 유한계의 가정 하에서 싸이클론 유입구로 추적자를 펄스 형태로 주입하고, 포집분진함과 원추부 사이에서 입자상 물질을 샘플링 함으로써 RTD 응답곡선을 얻을 수 있다. 고체 흐름에 대한 모멘텀 해석은 1차 모멘트, 2차 모멘트를 구함으로써 평균 체류시간과 분산도를 측정할 수 있다. 본 연구에서 1차 모멘텀인 평균 체류시간(T)은 식(7)으로 계산할 수 있다.

$$\tau = \int_0^\infty t E(t) dt \quad (7)$$

여기서 $E(t)$ 는 시간 함수로서 RTD의 확률함수이다. 고체 흐름의 체류시간에 대한 분산 값은 2차 모멘텀에 대한 식(8)에 의하여 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t-\tau)^2 E(t) dt \quad (8)$$

Stegowski과 Leclerc은 무한계와 추적자의 델타함수 주입이라는 가정 하에 상류의 한 지점에서 펄스추적자를 주입하고 하류의 한 지점에서 나타난 응답 곡선에 대한

모멘텀 해석을 통하여 분산계수를 구하였다[6]. 본 연구에서는 추적자의 주입이 완전한 델타 함수를 형성할 수는 없다는 단점이 있기는 하나, 사이클론 내의 고체 흐름의 체류시간이 불과 수 초에 불과하며 고체 입자의 샘플링이 용이하지 않기 때문에, 단일 지점 샘플링으로 분산정도를 추정하는 방법을 사용하였다.

모멘텀 해석을 통해 계산되는 체류시간 분포곡선의 분산값과 식(9)을 이용하여 분산정도의 표현인 N_{Pe} 를 구할 수 있다[7].

$$\sigma^2 = \left(\frac{2}{N_{Pe}^2} \right) (N_{Pe} - 1 + e^{-N_{Pe}}) \quad (9)$$

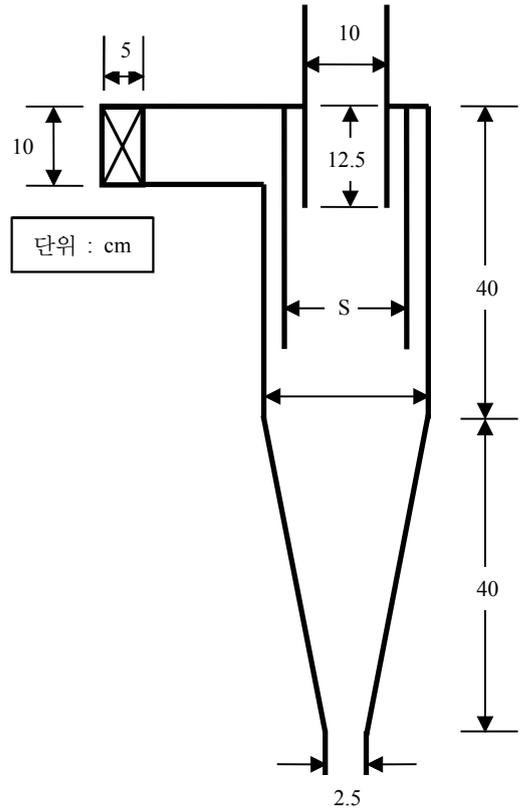
무차원군인 Peclet number(N_{Pe})는 사이클론 내에서 고체 흐름의 축 방향 혼합정도를 나타내는 무차원군이다. 만일 $N_{Pe} = \infty$ 이면 분산상 내의 고체 흐름은 플러그 흐름이고, $N_{Pe} = 0$ 이면 입자상 흐름은 완전 혼합임을 의미한다.

3. 실험

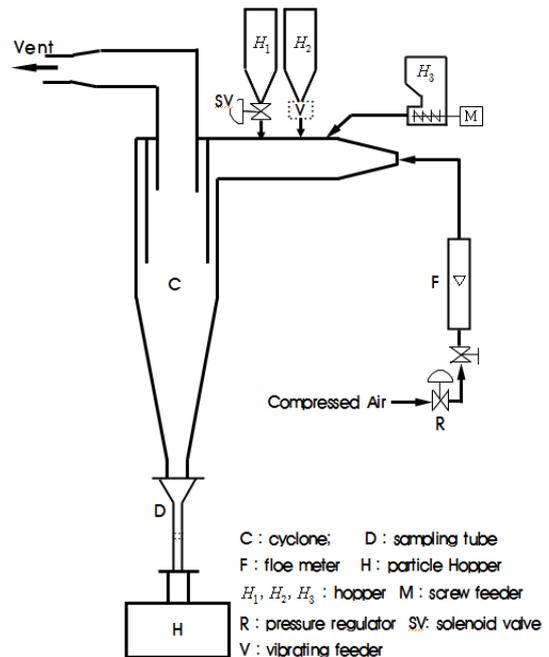
변형구조의 사이클론 집진기는 선회류 약화기가 2 단으로 구성되었다. 그 외의 기하치수비는 Lapple의 공업용 사이클론 집진기와 동일하게 제작되었으며, 그림 1에 나타내었다. 투명아크릴로 제작된 사이클론 집진기는 몸통경과 높이는 20cm와 40cm로 하였으며, 원추부와 몸통높이를 합한 전체 높이는 80cm로 하였다. 3 가지의 2단 선회류약화기(길이 = 26cm, S = 13cm, 15cm, 17cm)는 선회류 강화와 분진 역혼합을 최대로 줄이기 위하여 추가로 설치하였다.

본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 변형구조의 사이클론 집진기 본체와 분진을 주입하기 위한 스크류 입자 주입기와 진동 주입기, 미량의 추적자를 펄스 형태로 주입하기 위한 솔레노이드 밸브, 추적물질을 샘플링하기 위한 긴 튜브형 추적자 샘플러, 기체를 일정 압력과 유속으로 주입하기 위한 압력조절기와 유량계 및 분진 포집함으로 구성되어 있다.

공기필터를 통해 수분과 유분 등이 제거된 공기는 밸브와 유량계로 유량을 조절하여 변형구조 및 일반 사이클론 집진기의 입구로 주입한다. 사이클론 집진기가 안정 상태에 도달하면, 모터와 속도 조절기로 분진의 유입속도가 조절된 플라이에쉬를 원심력집진기의 입구로 주입



[Fig. 1] Geometric ratio of modified cyclone.



[Fig. 2] Schematic diagram of experimental apparatus.

하였다. 변형구조와 일반 싸이클론 집진기 집진특성을 평가하기 위해 분진 입경크기 분포와 무게가 측정된 플라이애쉬를 집진기 내로 주입하고 분진 포집함으로 집진되는 플라이애쉬 분진을 포집한다. 분진포집함에 집진된 플라이애쉬 무게를 측정하고, 입경분포를 X-ray 입도계수기(MarverIn 2000)를 이용하여 측정하였다.

일반 및 변형구조의 싸이클론 집진기 내에서 분진의 체류시간 분포와 분산정도를 추정하기 위한 고체입자의 주입은 내경 10cm, 높이 30cm인 진동 입자주입기를 이용하였고 추적자는 평균 입경크기가 시료의 크기와 동일한 글라스비드 입자에 KCl로 담지시킨 고체입자를 이용하였다. 추적자는 타임머에 의하여 개폐시간이 조절되는 솔레노이드 밸브를 이용하여 0.1초 동안 펄스형태로 0.3g 정도를 주입하였다. 분진 포집함 위치에 원추형 아크릴 튜브를 설치하여 포집된 글라스비드의 상승속도를 보정한다. 유량이 조절된 공기를 입구로 유입시킨 후, 진동 입자주입기를 이용하여 일정한 속도로 균일한 크기를 갖는 글라스비드(평균입경크기 = 112 μ m)를 집진기의 입구부분을 통해 주입시킨다. 주입된 글라스비드는 공기 흐름과 분산상을 유지한 후 집진기의 몸체와 원추부에서 공기흐름과 분리된다. 분리된 글라스비드는 원추부 하부에 설치된 원추형 튜브에 쌓인다. 원추형 튜브에 글라스비드가 일정높이에 쌓이면, KCl로 코팅된 글라스비드 추적자를 0.1초 동안 솔레노이드 밸브를 이용하여 집진기의 입구로 주입한다. 주입된 추적자와 글라스비드는 원추형 튜브에 쌓이게 된다. 원추형 튜브에 쌓인 추적자와 글라스비드 혼합물을 샘플링 깔로 일정높이 마다 채취하여 증류수에 침출시킨다. 1시간 동안 침출시킨 용액의 전기전도

도를 측정한다. 측정된 전기전도도와 보정곡선을 이용하여 고체입자의 체류시간분포와 혼합특성을 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

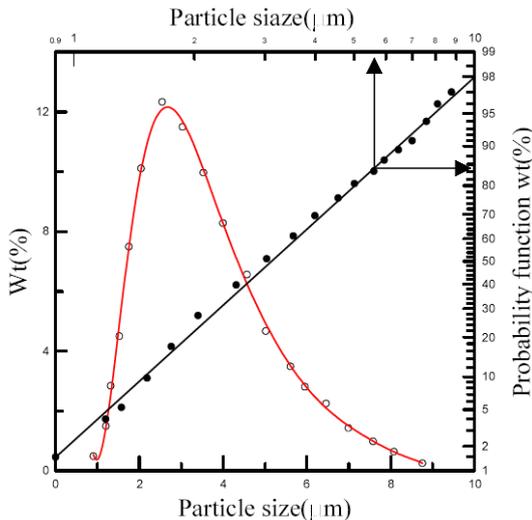
4.1 변형구조의 싸이클론 집진기에서 플라이애쉬 분진의 집진특성

4.1.1 플라이애쉬의 입경크기 분포

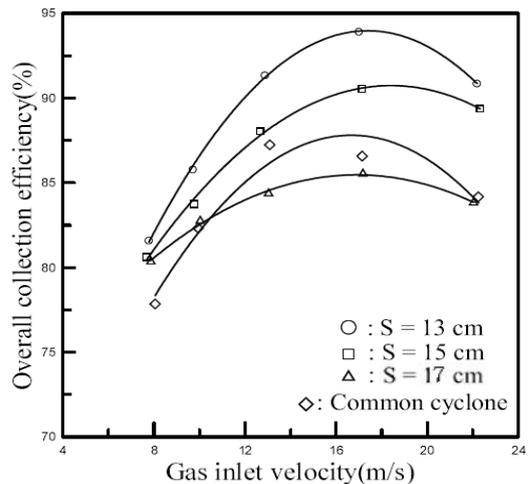
변형구조의 집진특성을 평가하기 위한 분진은 보령화력발전소에 설치된 전기집진기에 의해 포집된 플라이애쉬를 사용하였다. 그림 3은 플라이애쉬의 입경 크기분포를 나타낸 것이다. 대부분의 산업현장에서 발생하는 분진들은 비대칭 입경분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 실험에 사용된 플라이애쉬도 평균 입경크기 3.1마이크로미터를 중심으로 하는 비대칭분포를 갖고 있다. 확률대수분포를 이용하여 구한 플라이애쉬의 기하표준편차는 1.72 마이크로미터이다.

4.1.2 변형구조와 일반 싸이클론 집진기에서 플라이애쉬의 총 집진효율

그림 4는 유입가스의 입구속도에 따른 변형구조(S = 13, 15, 17cm)와 일반 원심력집진기에서 플라이애쉬 분진에 대한 전체 집진효율을 나타내었다. 그림에서 보듯이 S = 17 cm인 변형구조의 원심력집진기를 제외하고는 일반 원심력집진기의 총괄 집진효율보다 높게 나타나고 있다. 또한 S = 13cm인 변형구조의 원심력집진기가 가장



[Fig. 3] Particle size distribution of fly ash.



[Fig. 4] Overall collection efficiency of fly ash in a modified and common cyclone with gas inlet velocity.

높은 총 집진효율을 보이고 있다. 일정속도 이상의 유속에서는 벽면을 따라 흐르는 고체 입자의 흐름에서 내부 선회류 흐름으로 고체 입자의 비산 분리가 일어나는 것이 일반 원심력집진기의 특성이다. 하지만 변형구조의 원심력집진기에 추가 설치된 2단 선회류약화기가 이런 분진의 벽면 바운싱과 에디에 의한 재비산을 어느 정도 방지하고 있다.

4.1.3 변형구조와 일반 사이클론 집진기에서 플라이애쉬의 부분 집진효율

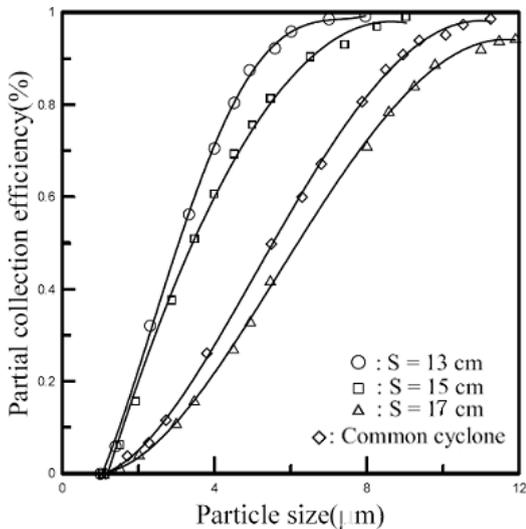
처리가스의 입구속도가 17m/s일 때 플라이애쉬 분진에 대한 변형구조와 일반 사이클론 집진기의 부분 집진효율을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 2단 선회류 약화기의 직경(S)이 13cm와 15cm인 변형구조의 사이클론에서 플라이애쉬의 부분 집진효율이 일반 사이클론 집진기보다 높게 나타나고 있다. 이는 추가 설치된 2단 선회류약화기가 선회류약화기와 원심력집진기의 입구영역에 만들어지는 난류성 에디와 몸통 영역에서의 벽면-분진 바운싱과 내부선회류-외부선회류의 동압차에 의한 분진 역혼합에 대한 인위적 차단효과에 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 S = 17cm인 변형구조의 부분 집진효율은 일반 공업용 원심력집진기보다 약간 낮게 나타나고 있다. 2단 선회류약화기와 몸통 사이의 간격이 지나치게 좁아지면, 2단 선회류약화기와 몸통 사이의 환상구역을 흐르는 처리가스와 분진의 선회속도가 매우 높아지게 된다. 이와 같은 강화된 분진과 처리가스의 선회속도는 몸

통하부와 원추에서의 분진의 역혼합과 2차 바운싱을 야기하는 것으로 사료된다. 또한 강화된 선회강도는 선회류 전환점의 길이를 분진 포집할 근처까지 확장함으로 포집 분진함에서 음압에 의한 포집 분진의 재비산을 야기하는 것으로 사료된다.

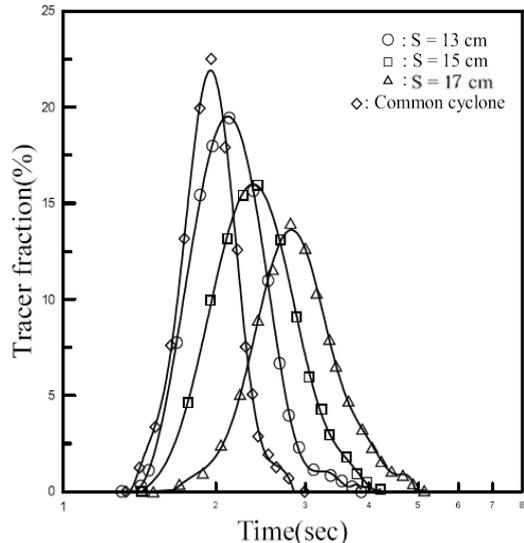
4.2 변형구조의 사이클론 집진기에서 글라스 비드의 체류시간분포와 역혼합

4.2.1 사이클론 집진기에서 글라스비드의 체류시간 분포

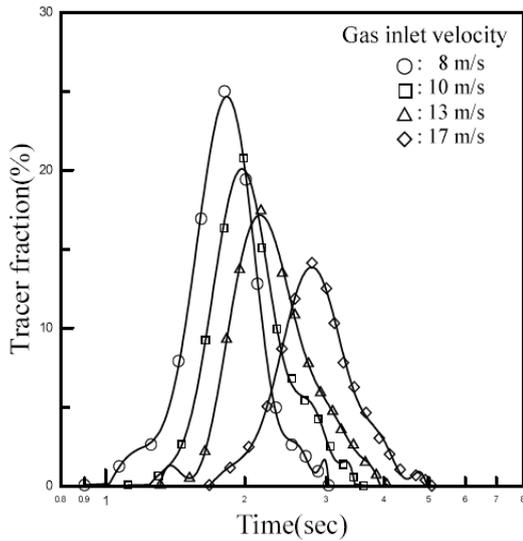
사이클론 집진기 내에서 분진의 체류시간 분포는 집진기 내에서 일어나는 분진의 역혼합과 같은 물리적 현상을 이해하는 데 매우 중요한 자료가 된다. 이와 같은 물리적 현상에 대한 이해는 분진의 집진 메커니즘에 대한 해석 능력을 향상시킬 수 있다. 일반 및 변형구조(S = 13, 15, 17cm)의 사이클론 집진기에서 처리가스 유입속도 17m/s에 대한 글라스비드의 체류시간 분포를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 변형구조의 사이클론 집진기의 체류시간 분포곡선의 응답시간과 폭이 일반 사이클론 집진기보다 증가하고 있다. 특히 이러한 경향은 2단 선회류약화기의 직경(S)이 증가할수록 증가한다. 이것은 2단 선회류약화기와 몸통 사이의 환상구역에서 선회류 강도가 증가하여 입자상 물질의 체류시간이 증가하기 때문으로 사료된다. 또한 변형구조에서의 입자 체류시간 분포의 편차가 커지고, 추적자 비율의 최대 강도가 감소



[Fig. 5] Partial collection efficiency of fly ash in a modified and common cyclone at gas inlet velocity = 17m/s.



[Fig. 6] Residence time distribution of glass bead in a common and modified cyclone with 2 stage vortex finer diameter{S}.



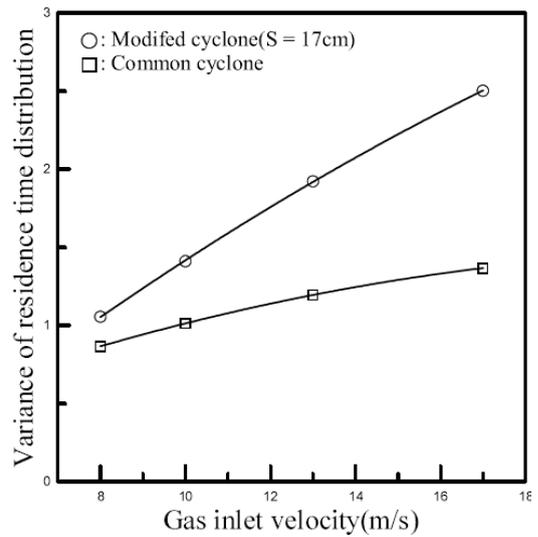
[Fig. 7] Residence time distribution of glass bead in a modified cyclone(S = 17cm) with gas inlet velocity.

하고 있다. 이는 입구의 환상구역에서 발생하는 난류성 에디의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 난류성 에디의 증가는 입구 영역에서의 환류성 분진의 양을 증가시킬 수 있다. 이런 경향은 S = 17cm에서 더 크게 나타나고 있다.

그림 7은 S = 17cm인 변형구조의 싸이클론 집진기에서 처리가스 입구속도에 따른 글라스비드의 체류시간 분포를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 것처럼 처리가스의 입구속도가 증가할수록 선회강도가 증가하여 체류시간 분포곡선의 최고값(= 최빈값)은 조금씩 긴 시간에서 나타나고 있으며, 분포곡선이 점점 큰 표준편차를 갖는 곡선 형태로 폭이 넓어지고 있다. 처리가스의 입구속도가 증가하면 글라스비드의 평균체류시간 증가와 입구-몸통 사이의 환상 구역에서 난류성 에디의 강도가 증가하게 된다. 그러므로 벽면을 따라 흐르는 분진 층 띠에서의 분진 역혼합이 크게 증가하게 된다. 또한 강화된 선회강도는 분진의 선회수를 증가시켜서 입자의 통과궤적을 증가시킨다. Yoshida와 Masuda는 유체의 파동은 짧은 거리의 흐름에는 영향을 주지 않으나 전체 입자의 궤적에는 영향을 주며, 이런 영향은 기상유속이 증가할수록, 입경크기가 감소할수록 크게 나타난다고 하였다[8].

4.2.2 싸이클론 집진기에서 글라스비드의 혼합

집진기에서 분진의 체류시간 분포에 대한 분산값은 체류시간 분포곡선의 펼쳐진 정도를 나타내는 정의이다. 이 분산값은 집진기 내에서 분진의 역혼합 정도를 도출할



[Fig. 8] Variance of solid residence time distribution in a common and modified cyclone(S = 17cm) with inlet gas velocity.

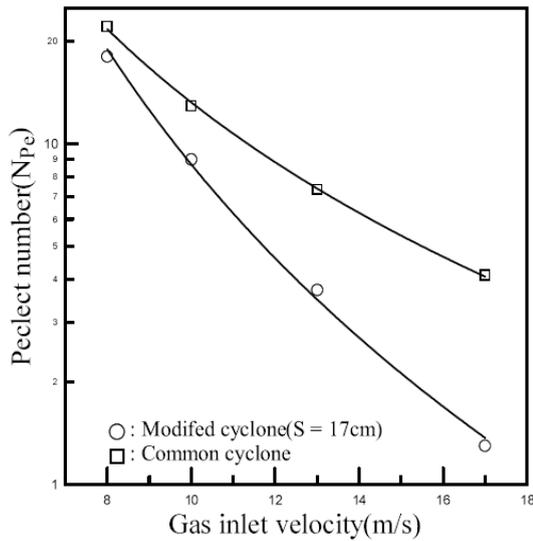
수 있는 중요한 파라미터이다. 싸이클론 집진기 내에서 분진의 체류시간 분포에 대한 분산값은 그림 6와 7에 나타난 체류시간 분포곡선과 식(8)를 이용하여 계산하였다.

그림 8은 변형구조(S = 17cm)와 일반 싸이클론 집진기에서 글라스비드의 체류시간분포에 대한 분산값을 나타내었다. 그림에서 보듯이 싸이클론 집진기들은 처리가스의 입구속도가 증가할수록 분산값은 선형적으로 증가하고 있다. 분산값의 증가폭은 변형구조에서 크게 나타나고 있다. 처리가스 유입속도의 증가는 난류성 에디에 의한 분진의 역혼합, 몸통이나 원주부 벽면에서 분진의 바운싱과 분진-벽면에서의 마찰응력 등의 증가를 유발한다. 또한 처리가스의 입구속도가 증가하면 입자상 물질의 통과궤적이 길어지므로, 난류성 에디와 바운싱 효과가 상승효과를 나타낸다. 이와 같은 분진 통과궤적의 상승효과로 인해 변형구조에서의 분산값이 일반 싸이클론 집진기보다 크고, 유속에 대한 상승폭도 더 커지는 것으로 사료된다.

Davis는 상 흐름을 갖는 파이프 내에서 난류성 에디의 확산도와 N_{Re} 의 관계를 다음의 수식으로 나타내었다[9].

$$D_{eddy} \propto \mu(N_{Re}) \tag{10}$$

기상 유입속도가 증가하면 N_{Re} 가 증가하므로, 위의 식에서처럼 난류성 에디의 확산도와 역혼합은 증가한다. Choa 등은 60 ~ 80 μm 이상의 크기를 갖는 분진이 벽면에서 바운싱되는 현상을 관찰하였으며, 바운싱된 분진은 높



[그림 9] N_{Pe} of glass bead flow in a common and modified cyclone(S = 17cm) with inlet gas velocity.

은 선회속도로 인해 벽면으로 휘어져 작은 바운싱을 연속적으로 하는 경향이 있다고 발표하였다[10]. 그러므로 N_{Re} 가 증가하면 난류성 에디의 역혼합, 벽면 바운싱과 벽면에서의 마찰응력의 증가하며 그로 인해 분산값이 증가한다는 사실을 잘 설명해주고 있다.

그림 9에 나타난 표준편차 값과 식(9)을 이용하여 입자상 물질의 혼합정도를 나타내는 N_{Pe} 를 계산할 수 있다. 그림 9는 변형구조(S = 17cm)와 일반 사이클론 집진기에서 글라스비드의 N_{Pe} 를 처리가스의 입구속도 함수로 나타내었다. 그림에서 보듯이 처리가스의 입구속도가 증가할수록 거의 대수적으로 감소하고 있다. N_{Pe} 의 감소 속도는 변형구조가 일반 사이클론 집진기보다 크게 나타나고 있다. 결국 N_{Pe} 의 감소는 집진기내의 분진흐름이 유속이 증가할수록 플러그흐름에서 완전혼합 흐름으로 전이하고 있음을 의미한다[7].

4. Conclusion

실험을 통하여 일반 사이클론과 변형구조 사이클론에서 플라이애쉬의 집진특성과 글라스비드의 체류시간분포와 역혼합 특성을 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 변형구조 사이클론(S = 13, 15cm)에서 플라이애쉬의 집진효율이 일반 사이클론보다 높게 나타났다.

- 2) 플라이애쉬의 집진효율은 2단 선회류약화기 직경(S) 13cm에서 가장 높게 나타났다.
- 3) S = 17cm인 변형구조 사이클론에서 플라이애쉬의 집진효율은 강화된 역혼합과 선회강도에 의한 고체의 벽면 바운싱으로 인하여 일반 사이클론보다 낮게 나타났다.
- 4) 글라스비드의 체류시간분포의 분산값과 평균체류 시간은 선회강도와 난류성 에디로 인하여 2단 선회류약화기의 직경(S)가 증가할수록 증가하였다.
- 5) 변형구조 사이클론에서 고체흐름의 역혼합은 기체 유입속도가 증가할수록 증가하였으며, 증가 상승폭은 일반 사이클론보다 높게 나타났다.

References

- [1] Z. Bingtao, "Prediction of Gas-Particle Separation Efficiency for Cyclones: A Time-off light Model", Separation Purification Technology, pp.171~177, Vol. 85, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.006>
- [2] K. W. Chu, S. B. Kuang, A. B. Yu, "Particle Scale Modelling of the Multiphase Flow in a Dense Medium Cyclone: Effect of Solid Flow Rate", Minerals Engineering, pp.34~45, Vol. 33, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.011>
- [3] D. Leith and W. Licht, "The Calculation Efficiency of Cyclone Type Particle Collector - A New Theoretical Approach", AIChE Semp. Ser., pp.196~204, Vol.68, 1972.
- [4] J. T. Dietz, "Collection Efficiency of Cyclone Separators", AIChE J., pp.888~892, Vol. 27, 1981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690270603>
- [5] S. K. Kang, T. H. Kwon, S. D. Kim, "Hydrodynamic Characteristics of Cyclone Reactors", Powder Technology, pp.211~220, Vol. 58, 1989.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910\(89\)80116-0](http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910(89)80116-0)
- [6] Z. Stegowski and J. P. Leclerc, "Determination of the Solid Separation and Residence time Distribution in an Industrial Hydrocyclone Using Radioisotope Tracer Experiment.", pp.67~77, Vol. 66, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00009-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00009-1)
- [7] Y. Gao, F. J. MuJio, M. G. Ierapetritou, "A Review of the Residence Time Distribution Application in Solid Unit Operations", pp.416~423, Vol. 228, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.060>
- [8] H. Yoshida and H. Masuda, "Model Simulation of

Particle Motion in Turbulent Gas-Solid Pipe Flow", Powder Tech., pp.217~220, Vol. 26, 1980.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910\(80\)85065-0](http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910(80)85065-0)

[9] J. T. Davis, "Collection Efficiency of Cyclone Separators". Academic Press, pp.88~93, 1972.

[10] Z. Choa, G. Sun, J. Jiao, et al., "Gas Flow Behavior and Residence Time Distribution in a Rough-cut Cyclone" Chem. Eng., pp.43~52, Vol. 106, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2004.06.014>

강 순 국(Kang-Soon Kang)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 화학공학과 (화학공학석사)
- 1992년 2월 : 한국과학기술원 화학공학과 (화학공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

대기오염제어, 나노신소재 활용