

연소실내의 2상유동 제어에 관한 연구

박상규* · 김정훈** · 임종한***

A Study of Two Phase Flow Control in a Combustion Chamber

S-K Park* · J-H Kim** · J-H Lim***

Key words : Primary jet(1차분류), Recirculation zone(재순환영역), Secondary jet(2차분류), Two-phase flow(이상유동)

Abstract

Two-phase flow in a combustion chamber is experimentally analyzed according to the five different conditions in the Reynolds number of 1.02×10^4 . As the height difference between the primary and secondary jets increases, the secondary has a little less effect on the primary one. In the case of the same height difference, the primary jet is affected as the velocity of the secondary one increases. The primary-jet flow field causes the particle concentration since the particle stagnation phenomena appear in the recirculation zone. The particle concentration is controlled by the velocity of secondary jet, the height difference, and the angle of primary jet in the test section.

1. 서 론

기체에 고체입자가 부상된 2상 난류유동은 연소실내의 조건에 따라 유체입자들 사이의 운동량교환이 활발히 이루어져 입자의 감속과 확산 등 복잡한 유동현상이 나타나며, 이러한 유동에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 또 연소실에 2개의 분류의 존재로 두 분류의 상호작용으로 연소실내의 압력, 속도, 전단응력 등의 변화로 영향을 받기 때

문에 공학적 활용가치가 크다고 볼 수 있다. 분류간의 상호관계는 항공기 터보 엔진내의 압축공기와 연료분무 혼합현상, 대형로켓의 액체연료 추진체에서 노즐출구에서의 분류의 상호관계, 내연기관의 연료분사노즐에서 분사되는 분무간의 간섭현상과 같은 액체와 기체가 혼합된 경우와 공기오염에 따른 먼지 입자의 침강과 유동, 미분탄 연소기, 석탄분말이송장치 및 화학플랜트에서 펠릿의 공기이송장치 등과 같은 고체와 기체의 혼합유동

* 여수대학교 기계자동차공학부(원고접수일 : 2000년 2월)

** 여수대학교 대학원 박사과정

***경원전문대학 자동차과

등에서 볼 수 있다. 특히, 기체와 고체가 혼합된 유동에서 입자가 부상된 2상 난류유동에서 입자의 수송은 일반적으로 제한유동과 자유전단유동으로 나눌 수 있다. 예를 들면 제한유동은 분말과 같은 고체입자를 압축된 공기를 이용하여 이송시킬 때 관내유동에서 볼 수 있고, 자유전단유동은 노즐로 분사되는 제트유동 등에서 볼 수 있다. 관내유동은 적은 송풍기의 동력을 이용하여 압축공기로 분말 및 펠릿을 침강없이 많은 양을 이송시키는 장점 등이 있어 널리 이용되고 있다. 그러나 유동의 압력강하특성, 벽면재질에 의한 침식작용, 충돌하는 입자의 질량, 속도 및 충돌각도 등이 관내유동에 크게 영향을 미친다고 보고 하고 있다¹⁾. Ribeiro²⁾와 Antonia 등³⁾은 원형분류 및 동축분류에서 난류유동특성과 두 분류가 혼합되는 혼합유동의 형성을 분석 하였으며, Okamoto⁴⁾는 두 원형노즐로부터 평행하게 분사시켜 두 분류의 혼합과정을 속도, 정압 및 등속도선도를 이용하여 유동장을 규명하였다.

Shi 등⁵⁾은 PDA를 이용하여 분류층 연소실내의 입자분포 및 속도를 측정분석하여 입자의 속도는 기체속도의 직접적인 영향을 받지 않는다고 밝혔으며, Shakouchi 등^{6,7)}은 원통면에 노즐을 부착시켜 곡면 벽제트를 형성시켜 원통중심각에 따른 미분탄의 속도, 농도, 과립직경등을 측정분석 하였다. Park⁸⁾은 미세분말과 공기를 혼합한 2상유동을 1차분류로 분사하고, 2차분류에서 공기의 속도를 3가지로 변화시켜 연소실내의 2상유동의 코안다 효과가 2차분류의 속도의 영향으로 나타나는 것을 실험적으로 규명하였다.

따라서, 본 연구는 연소실 중심에 위치한 노즐을 통하여 미세 고체분말과 공기가 혼합된 2상유동을 중심축에 부착된 노즐을 통하여 연소실에 분사시키고, 중심부 하단부에 부착된 노즐로는 공기만을 분사하도록 하였다. 2차의 압축된 공기분류는 분류의 높이차, 속도차와 분사각 제어에 따른 2상유동의 혼합과정을 규명하고자 한다. 입자의 속도벡터장 및 농도장 값들은 PDA⁹⁾ (Particle dynamics analyzer)를 사용하여 측정, 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 분류발생장치, 시험부 및 분말흡입장치 등으로 크게 3부분으로 나눌 수 있으며, 전장은 약5m이다. Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다.

분류발생장치의 원심형 송풍기는 3.7Hp, 3상 유도전동기에 의해 구동되고, 최대풍량은 10m³/min, 3420rpm으로 무단 변속된다. 송풍기에서 발생하는 압축된 공기유동은 정류실에서 같은 방향으로 두 개의 흐름으로 나뉘어진다. 시험부는 사각단면 형태의 시험부로 만들어 졌으며, 시험부에 유입되기 전 중심축으로 향하는 1차분류는 유량계와 유량을 조절하는 밸브를 거쳐, 시험부 500mm앞에 설치된 분말공급기로부터 공급되는 미세분말과 압축된 공기와 혼합되어 2차원으로 만들어진 평면노즐을 통하여 시험부에 분사된다. 2차분류는 유량계와 밸브를 거쳐 시험부 중심축으로 분사되는 1차분류 중심보다 높이변화 (H=32.5mm, 47.5mm), 2차분류의 속도변화(60m/s, 75m/s) 및 2차분류 각도변화에 따라서 동일한 방향으로 분사되도록 하였다. 2차분류

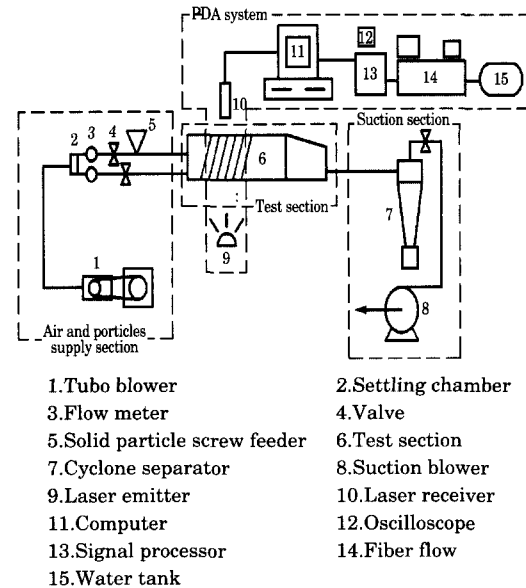


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

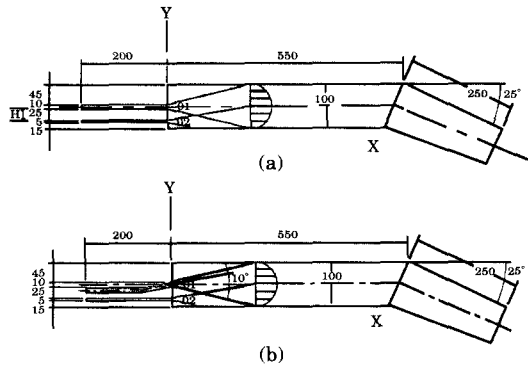


Fig. 2 Coordinate system and section

는 압축된 공기만이 분사되도록 하였다. 두개의 노즐로 부터 분사된 분류는 시험부내에서 혼합되며, 이 혼합된 2상유동은 사이클론, 필터를 거쳐 미세분말과 공기를 분리시켜, 흡입 송풍기를 이용하여 공기만을 대기중으로 분출 되도록 제작하였다. 연소실에 부착된 두개의 2차원으로 만들어진 평면노즐 출구면은 1차분류의 경우는 세로폭(D), 가로(L)가 10mm, 200mm이고, 2차분류는 세로폭(D)5mm, 가로(L)200mm로 제작하였다. 1차분류 출구면을 기준으로 세로, 가로 형상비 (Aspect ratio)가 1 : 20이 되어 1차분류 중심축에서 분류가 2차원성을 유지하도록 하였다. 시험부는 가로, 세로, 길이 각각 200, 100, 550mm인 투명아크릴로 제작하였으며, 미세분말을 유도하기 위하여 시험부 후류부분의 상판을 25° 기울게 하여 미세분말을 제어 하도록 설계하였다. Fig.2의 (a)는 두 분류가 동일한 방향으로 분사되도록 만들어진 시험부이며, (b)는 1차분류의 중심축이 10° 상향으로 분사되는 시험부이다.

2.2 실험방법

실험은 5가지의 조건변화에 대한 시험부내의 유동장을 비교 분석한다. 실험1은 미세분말과 공기로 혼합된 2상유동이 1차분류 노즐로만 시험부에 분사되고, 2차분류는 없는 경우이다. 송풍기로부터 공급되는 압축된 공기가 유량계를 통과할때의 속도는 15m/s이다. 실험2와3은 1,2차분류의 간격이 32.5mm, 47.5mm의 높이 차를 두었으며, 2차분류의 속도는 1차공기속도의 4배 인 60m/s이다.

Table 1. Experimental conditions

Exp.	Primary jet velocity(m/s)	Secondary jet velocity(m/s)	Height difference of two jets(H : mm)	Angle of primary jet
1	15	0	0	0
2	15	60	32.5	0
3	15	60	47.5	0
4	15	75	32.5	0
5	15	60	32.5	10° upward

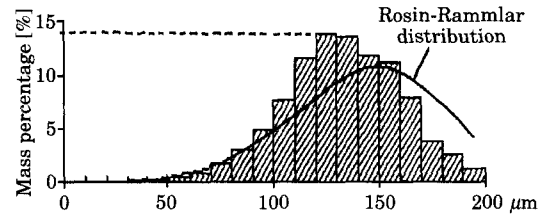


Fig. 3 Particle diameter distribution

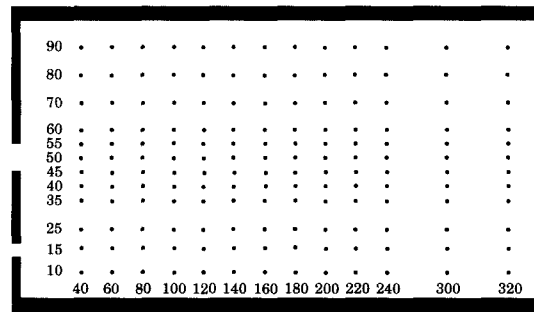


Fig. 4 Position of test points

실험4는 실험2의 조건에서 2차분류속도를 75m/s로 하였으며, 실험5는 실험2의 조건에서 1차분류의 각도가 1차분류 중심축에서 10° 상향으로 고정되어서 1차분류가 분사되도록 하였다. 각 조건의 실험은 1차분류의 공기가 상온에서 유량계를 통과한 공기의 속도(U1 : 15m/s)와 1차분류 출구면의 폭을 기준으로 Reynolds No. 1.02×10^4 에서 수행하였다. Table1은 본 실험에서 수행한 5가지 실험 조건을 나타낸다.

실험에 사용한 미세분말은 구형도가 좋은 0-200μm 직경의 수지입자를 사용하였다. Fig.3은 본 실험에 사용한 수지입자의 분포도이며, 이 수지는 미세분말 공급기로부터 40.2kg/hr 공급된다. 측정영역은 노즐출구에 인접한 부근에서는 X축

간격을 20mm, Y축간격은 1,2차분류가 분사되는 혼합영역에서는 5mm간격으로 그밖의 영역에서는 10mm간격으로 넓혀서 측정하였다. X축 후류로 갈수록 점차 측정간격을 40mm로 간격을 넓혀 X축 400mm까지 X, Y축 13X12 측정 포인트를 설정하여, 입자의 속도 $\pm 500\text{m/s}$, 직경 $0\sim 10000\mu\text{m}$ 까지 측정 가능한 Signal processor, Fiber flow, Laser emitter, Laser receiver, Oscilloscope로 구성된 DANTEC제품의 3차원 측정 가능한 PDA(Particle dynamic analyzer)에 의해 측정하였다. 얻어진 데이터를 이용하여 시험부내의 입자의 속도장, 농도장 및 난류성분들을 분석하였다. Fig.4는 측정위치 및 범위를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균입자의 속도장

Fig.5—Fig.9는 각 조건에 따른 평균입자의 속도장을 나타낸 것이다. Fig.5는 2상유동의 형태로 1

차분류만이 시험부에 분사되는 경우이다. 시험부 내로 분사된 혼합된 2상분류는 분류의 확산 및 성장으로 인하여 X축 후류로 갈수록 입자의 속도가 전반적으로 점차 감소되는 일반적인 분류의 경향을 나타낸다. 2상유체 입자의 중력 및 관성력의 영향으로 Y축 50mm인 중심을 기준으로 상,하 대칭이 이루어지지 않는다. 약 Y축 60mm이하에서는 입자의 속도가 대부분 양의 속도를 나타내고 있으나, Y축 60mm이상의 영역에서는 입자의 유동이 뚜렷하게 반대방향으로 유동이 형성되어 시험부내의 재순환영역이 존재함을 알 수 있다. Fig.6과 Fig.7은 표1의 실험2, 실험3 조건의 경우이다. 두 분류의 간격이 좁을수록 압력차에 의한 코안다효과로 인하여 1차분류에 영향을 크게 미쳐 1차분류는 시험부 하단방향으로 기울어진다. Fig.8과 Fig.9는 실험4,5의 조건이다. 2차분류의 속도가 증가하게 되면 코안다효과가 크게 나타나 유선이 2차분류 중심쪽으로 기울어지게 된다. 이 영향으로 시험부 중심인 Y축 50mm까지 입자의 음의 속도

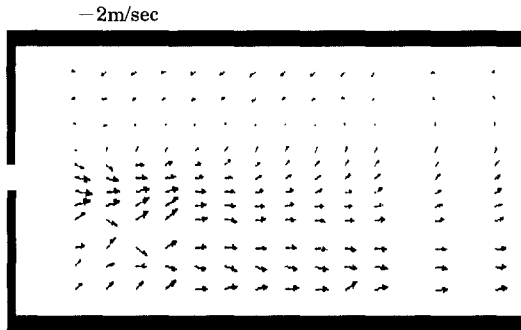


Fig. 5 Particle mean velocity in Exp.1

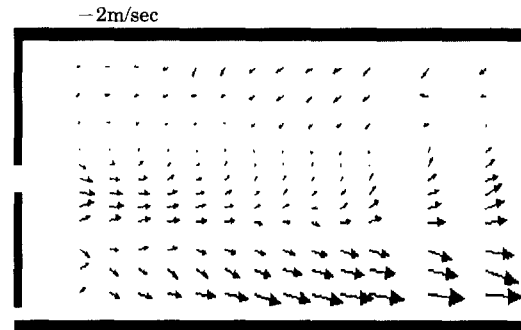


Fig. 7 Particle mean velocity in Exp.3

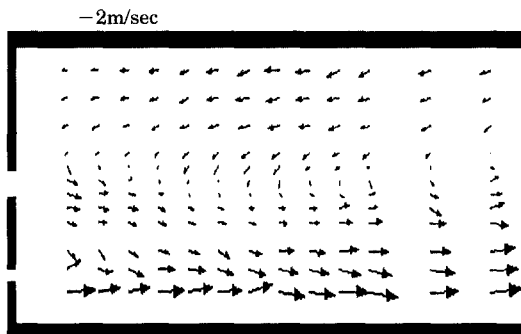


Fig. 6 Particle mean velocity in Exp.2

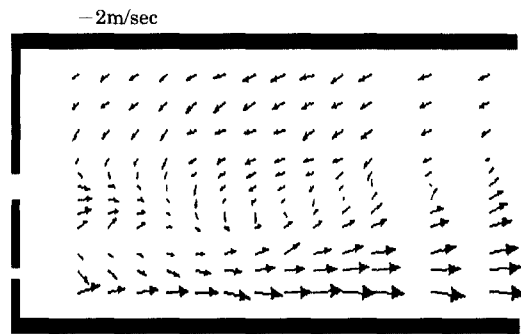


Fig. 8 Particle mean velocity in Exp.4

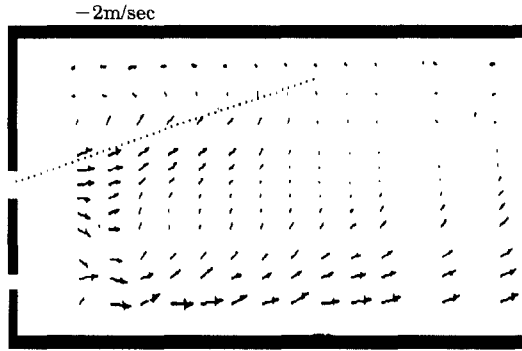


Fig. 9 Particle mean velocity in Exp.5

가 생성된다. 두 분류와의 높이차가 증가하면 1차 분류가 영향을 적게 받기 때문에 유동장 변화는 적게 나타난다. Fig.9의 실험5는 1차분류가 10° 상향 분사되는 조건이다. 10° 상향으로 1차분류가 분사되기 때문에 시험부내에서는 2차분류의 영향을 직접적으로 받지 않는 것으로 나타나고 있다. 입자의 역류유동이 파선의 윗부분에서 많이 존재하고 대부분의 입자유동은 X축방향으로 진행되며, 2차분류의 확산이 다른조건 보다도 크게 나타난다. 이 영향으로 시험부내의 중심부에서 입자의 정체가 크게 이루어짐을 예측할 수 있다. 1차분류 입자의 관성력 및 중력의 영향은 2차분류의 속도 및 각도의 영향을 크게 받으며 코안다효과로 시험부내의 입자의 유동이 시계반대방향으로 회전되는 유동장이 크게 형성되는 재순환영역이 생성되어 입자의 정체가 일어나 농도가 농후해질 것으로 사료된다.

3.2 1차분류 중심축의 입자의 속도

Fig.10은 본 실험의 5가지 경우의 실험에서 1차분류의 중심축 변화에 따른 입자속도를 나타낸 것이다. 실험1은 자유분류의 특성과 같이 1차분류가 시험부내로 분사된후 주위유체의 유입현상으로 입자속도가 점차 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다. 각 조건에 따른 중심축에서의 입자의 속도는 약 X축 150mm인 영역에서 1,2차분류의 영향으로 최소값을 유지하다가 2차분류가 성장함에 따라 후류로 갈수록 속도가 점차 증가하는 것으로 나타나고 있다. 실험2,5의 경우도 1차분류에 영향을 미친다. 실험5의 1차분류가 상향으로 분사되는 경우에는 입자속도가 노즐로부터 분사되는 이후에 급격

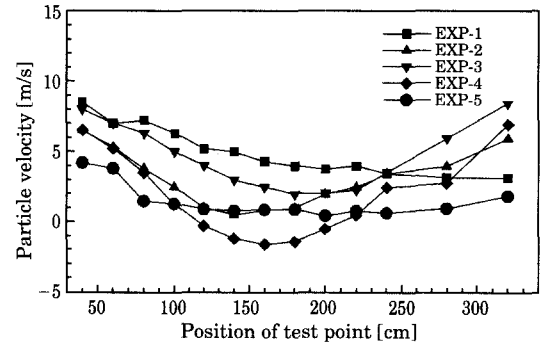


Fig. 10 Comparison of particle velocities on the central axis

히 작아지며 거의 0에 가까운 값을 보이고 있다. 1차분류가 상향분사되면 두 분류의 간격차가 32.5mm라 하더라도 2차분류가 영향을 미치지 못하기 때문이라 사료된다. 그러나 동일한 두 분류의 간격차를 유지하고 2차분류의 속도를 5배로 증가하는 실험4의 경우에는 1차분류 중심축 120mm인 지점에서 U/U_0 값이 음의 값을 나타내고 약 220mm되는 곳에서부터 양의 값으로 회복하고 있다. 이는 2차분류의 속도의 증가로 재순환영역이 시험부 전반부에서 나타나기 때문이라 사료된다. 따라서 시험부내에서 입자의 정체가 심하게 되는 것은 분류의 높이 및 분사각 보다는 2차분류의 속도가 커짐에 따라서 더 영향을 많이 받는 것으로 나타나고 있다. 이는 두 분류가 압력구배에 의한 혼합이 빨리 이루어져 운동량 교환이 클것으로 사료된다.

3.3 입자의 농도분포

Fig.11~Fig.15는 각 실험조건의 시험부내의 측정위치에서 단위체적당 입자의 농도분포를 나타낸 것이다. Fig.11의 실험1은 1차분류가 분사되는 경우로서 분류 확산영역권내에서는 입자의 농도가 균일하게 분포되고 있다. 1차분류 중심축 후류로 갈수록 X축 각 단면에서의 농도의 차가 없고 거의 균일하게 나타난다. Fig.12와 Fig.13은 높이차의 변화에 따라서는 높이차가 클수록 농도가 농후한 영역이 넓어지나, 2차분류의 속도가 커지면 농후한 영역이 노즐 출구에서부터 약 X축 140mm되는 곳까지는 입자의 정체가 크게 나타나

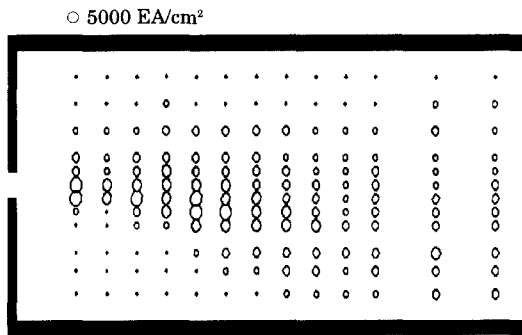


Fig. 11 Particle concentration in Exp.1

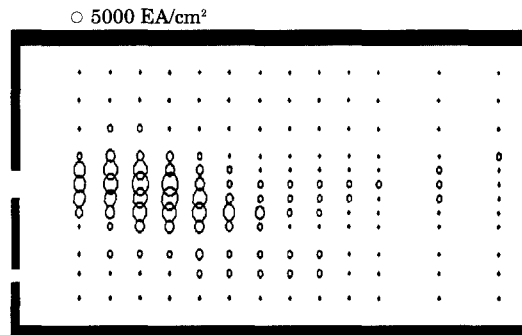


Fig. 14 Particle concentration in Exp.4

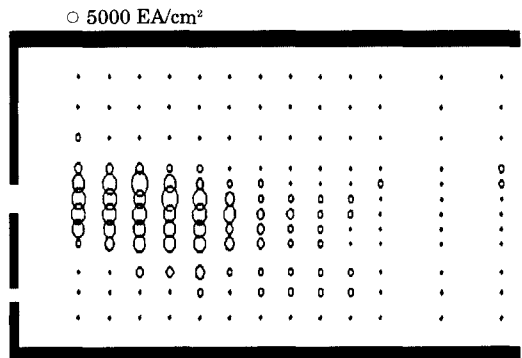


Fig. 12 Particle concentration in Exp.2

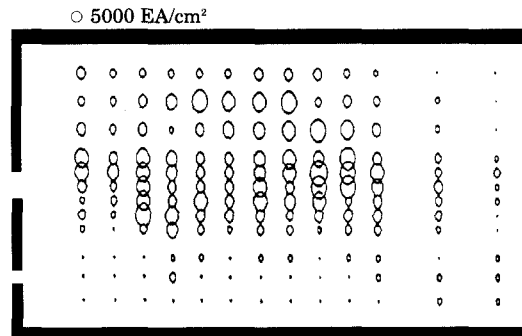


Fig. 15 Particle concentration in Exp.5

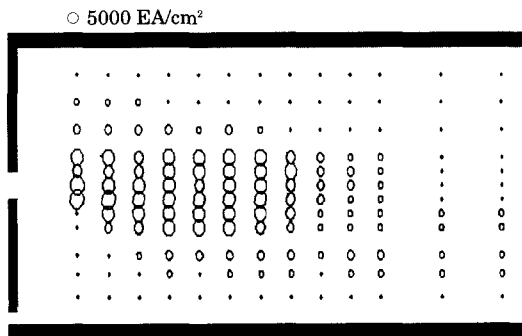


Fig. 13 Particle concentration in Exp.3

고, 입자의 농도가 농후하게 나타나고 있다. X축 140mm 이후에서는 2차분류의 속도에 의해 갈수록 입자의 농도가 희박해지면서 X축변화에 관계없이 각 단면에서 고른 분포를 나타낸다. 1차분류의 상향각이 존재하면 시험부내의 Y축35mm 이상에서는 농도가 고른분포를 나타내나, Y축35mm 이하에서는 입자의 농도가 희박하게 나타나고 있다.

이것은 2차분류의 성장과 확산이 1차분류에 영향을 미치지 못하기 때문이며, 입자의 와류현상으로 인한 재순환영역과 도 밀접한 관계가 있는 것으로 추정할 수 있다. 각 조건에 따라 시험부내에서의 미세한 차에 의한 재순환영역의 형성되며 이로 인하여 입자가 정체되어 농도가 농후하게 나타난다.

4. 결 론

본 실험은 Reynolds 수 1.02×10^4 에서 5가지 조건의 변화에 따른 시험부내의 2상유동에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1차분류는 두 분류간의 높이차가 커 짐에 따라 영향을 적게 받고, 높이차가 같은 경우에는 2차분류의 속도가 커짐에 따라 영향을 받는다.
2. 1차분류의 유동장은 두 분류의 영향으로 재순환영역이 발생하여 입자의 정체현상 때문에 농도에 직접적인 영향을 미친다.

3. 입자의 농도는 시험부내에서 2차 분류의 속도, 높이차 및 1차 분류의 각도에 의해서 조절될 수 있다.

후 기

본 연구는 여수대학교 설비자동화 및 정보시스템연구개발센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Neilson, J. H and Gilchrist, A, "An Analytical and Experimental Investigation of Velocities of Particles Entrained by the Gas Flow in Nozzles", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.33, part 1, pp.131~149, 1968
2. Ribeiro, M. M and Whitelaw, J. H., "Statistical Characteristics of a Turbulent Jet", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.70, part 1, pp.1~15, 1975
3. Antonia, R. A. and Bilger, R. W., "An Experimental Investigation of a Axisymmetric Jet in a Co-flowing Air Stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.61, part 4, pp.805~822, 1973
4. Okamoto, T. and Yagita, M., "Interaction of Twin Turbulent Circular Jet", *Bulletin of JSME*, Vol.28, No.238, pp.617~622, 1985
5. Shi, X. F., Qian, R. Z. and Xiao, P. H., "개봉분체와 분체 PDA 측량 및 저휘발분 매분 열대대비적 시험연구", *Power Engineering*, 제15권, 제2기, pp.19~22, 1995
6. Shakouchi, T. and Ichikawa, A., "Analysis of Gas-particle Two-phase jet over a Cylindrical Surface : Diffusion of Solid Particles", *Gas-Solid Flows ASME*, Vol.121, pp.71~76, 1991

7. Shakouchi, T., Onsoheru, Y. and Kato, S., "Analysis of a Two Dimensional, Turbulent Wall Jet Along a Circular Cylinder", *JSME International Journal*, Vol.32, No.3, pp.332~339, 1989
8. 박상규, 양희천, 정동화, "속도차가 존재한 두 분류의 2상유동에 관한 연구", *한국박용기관학회지*, 제22권, No.4, pp.515~521, 1988
9. PDA Inatallation and User' s guide, DANTEC.

저 자 소 개



박상규 (朴相圭)

1960년 5월생. 1981년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업. 1983년 인하대학교 대학원(공학석사). 1989년 인하대학교 대학원(공학박사). 1991년~현재 여수대학교 기계공학과 부교수



김정훈 (金廷勳)

1961년 3월생. 1988년 서울산업대학교 기계공학과 졸업. 1998년 여수대학교 대학원(공학석사). 1999년~현재 여수대학교 대학원 박사과정



임종한 (林宗漢)

1957년 8월생. 1981년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업. 1985년 경희대학교 대학원(공학석사). 1992년 경희대학교 대학원(공학박사). 1995년~현재 강원전문대학 자동차과 조교수