

## 높이차가 존재하는 두 분류의 2상유동에 관한 연구

박상규\* · 양희천\* · 이용호\*\*

### Study on Two-Phase Flow generated by Two Jets with Height Difference

S. K. Park · H. C. Yang · Y. H. Lee

**Key words** : Two phase flow (2상유동), Jet (분류), Solid particle(고체입자), Recirculation zone (재순환 영역)

#### Abstract

In this study, the mixing process of two-phase flow generated by two jets with height difference is analyzed. The primary jet is jetted on the condition of the state mixed pulverized solid particles with air. The height difference between the main jet and the secondary jet is changed into three kinds(0, 32.5, 47.5mm). The velocity vector field, concentration field and turbulent properties of solid particles are measured by using 3-Dimensional Particles Dynamics Analyzer. As the height difference of two jets through the two nozzles increases, the solid particle recirculation zone and the dense zone in the combustion chamber become large. The solid particle concentration at the center of the combustion chamber gets dense because the particle velocity remains slow due to the existence of the solid particle recirculation zone. The particle concentration in the combustion chamber can also be influenced by the height difference of two jets.

#### 1. 서 론

고체입자 혹은 액적이 부상된 2상난류유동은 입자의 유동과 침강, 미분탄 연소기, 디젤엔진의 분사, 석탄분말의 공기장치, 터보기계 및 로켓추진노즐 등의 산업분야에서 볼 수 있다. 기체와 고체로 혼합된 2상유동의 형태를 제한유동(confined flow)과 자유전단유동(free shear flow)으로 나눌

수 있다<sup>(1)</sup>.

제한유동의 예로서는 압축공기를 이용한 석탄 가루를 수송하는 관내유동을 들 수 있고, 자유전단 유동은 연소기 등에서의 제트유동을 들 수 있다. 관내유동에서는 작은 송풍기의 동력으로 많은 양의 석탄을 침강없이 수송하는 것이므로 입자가 부상된 2상유동의 압력강하특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 또 미세한 고체가 함유된 2상유동

\* 여수대학교 기계·자동차공학부(원고접수일 : 99년 9월)

\*\* 여수공업대학 기계자동차계열

은 벽면의 재질, 충돌하는 입자의 질량, 속도 및 충돌각도 등이 벽면의 침식작용에도 영향을 미친다고 보고하고 있으며<sup>(2)</sup> 석탄가스화 복합발전기술에서 분류층 가스화 장치에서도 볼 수 있다. 복합발전은 석탄가스화, 가스정제장치 및 가스터빈 등의 각각의 성능을 향상시킴으로써 높은 열효율을 달성할 수 있다. 그 중 하나인 석탄가스화장치를 보면, 석탄가스화 복합발전 초기에는 고정층 가스화장치를 채택하였으나, 유동층방식을 거쳐 현재 대부분 분류층 가스화장치를 목표로 개발하고 있다. 고정층 및 유동층 가스화장치는 석탄종류에 대한 제한성과 연소반응속도가 느리지만 분류층 가스화장치는 다양한 탄종에 관계없이 석탄을 미세한 분말로 만들어 분사하기 때문에 대용량화 할 수 있는 잇점이 뛰어나고, 가스화한 후 집진 및 탈황정제하여 SOx, NOx, 분진 및 CO<sub>2</sub> 등의 공해물질을 줄일 수 있고, 또한 발전효율이 높아 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다는 장점 때문에 차세대 발전기술로 응용되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

Kim등<sup>(3)</sup>은 석탄가스화 복합발전 시스템의 구성 기기들의 장,단점을 비교 분석하였고, Yuan 등<sup>(4)</sup>이 미분탄의 입자크기에 따라 연소가 착화온도, 시간, 거리, 불꽃전달속도 및 NOx 감소에도 직접적인 영향이 있는 것으로 보고하였다. Chuan<sup>(5,6)</sup>은 연소실내의 착화온도는 석탄탄종과 관련이 있고, 연소시 저휘발 미분탄의 계가 비산되어, 냉각벽판의 고온부식, 연소실내의 부착 등 부작용을 일으키며 미분탄의 국부적인 정체와 연소실내의 연소상태에 직접적인 영향을 미친다고 보고하고 있다.

Shi등<sup>(7)</sup>은 PDA를 이용하여 분류층 연소실내의 입자분포 및 속도를 측정 분석하여 입자의 속도는 기체속도의 직접적인 영향을 받지 않는다고 밝혔다. Shakouchi 등<sup>(8,9)</sup>은 원통면에 노즐을 부착하여 곡면 벽체를 형성시켜 원통 중심각에 따른 미분탄의 속도, 농도, 과립직경 등을 측정분석 하였으며, Kim<sup>(11)</sup>은 미세분말과 공기를 혼합한 2상유동을 1차분류로 분사하고, 2차분류에서는 공기의 속도를 3가지로 변화시켜서 연소실내의 코안다 효과를 실험적으로 규명하였다.

이와같은 배경으로 본 연구는 연소실 중심에 위치한 노즐을 통하여 미세분말과 공기를 혼합시킨

2상유동을 사각연소실에 분사시키고, 같은 방향으로 두 분류의 높이차가 존재하는 다른 노즐로는 1차측 공기의 4배속도의 공기만을 분사시켜 연소실내에서 혼합유동이 되도록 하였다. 실제 연소상태에서는 미세분말과 공기가 동일방향으로 분사되기 때문에 연소실 출구에서는 고온가스의 냉각으로 인한 에너지 손실과 고온반응에 따른 슬래그의 배출성 등의 문제점이 상존하는데 이를 보완하기 위한 선행과제로 비연소시 연소실내에서 입자의 속도벡터장, 농도장 및 난류특성치 등의 유체역학적 거동을 규명하기 위해 PDA<sup>(10)</sup> (Particle dynamics analyzer)를 사용하여 측정, 분석하였다. 이 결과는 고효율, 저공해, 분류층 가스화장치 및 산업용보일러 연소실 최적설계를 위한 기초자료로 사용되는데 목적을 두고 있다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 실험장치는 분류발생장치, 시험부 및 분말흡입장치등으로 크게 3부분으로 나눌 수 있으며, 전장은 5m이다. Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다.

송풍기에서 나오는 압축된 공기유동은 정류실에서 들로 나뉘어 진다. 사각 연소실 중심축으로 향하는 1차분류는 유량계와 유량을 조절하는 밸브

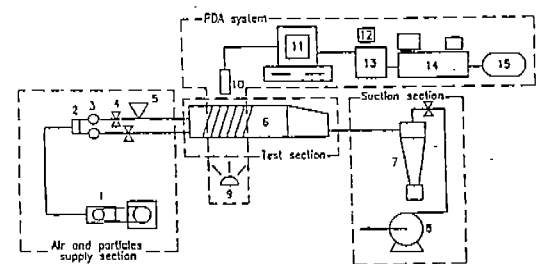


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

- |                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| 1. Turbo blower                | 2. Settling chamber |
| 3. Pipe type flowmeter         | 4. Valve            |
| 5. Solid particle screw feeder | 6. Testesection     |
| 7. Cyclone seperator           | 8. Suction blower   |
| 9. Laser emitter               | 10. Laser receiver  |
| 11. Computer                   | 12. Oscilloscope    |
| 13. Signal processor           | 14. Fiber flow      |
| 15. Water tank                 |                     |

Table 1. The conditions of experiment

Experiment	Primary jet velocity (m/s)	Secondary jet velocity (m/s)	Height difference H(mm)
1	15	0	0
2	15	60	32.5
3	15	60	47.5
Ref.	15	75	32.5

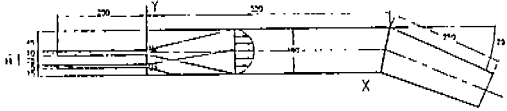


Fig. 2 Coordinate system and test section

를 거쳐, 연소실 입구 500mm앞에 설치된 분말공급기로부터 미세분말과 혼합되어 2차원으로 만들어진 평면노즐을 통하여 연소실에 분사된다. 2차분류는 유량계와 밸브를 거쳐 연소실 중심축으로 분사되는 1차분류 중심 보다 간격(H)이 32.5, 47.5mm 아래인 위치에 2차분류 중심이 되도록 하여, 두 분류의 높이차가 3가지로 변화 되도록 제작하였다. Table 1에는 본 실험의 조건을 나타낸다.

두개의 노즐로부터 분사된 각각의 분류는 연소실내에서 혼합되며, 이 혼합된 2상유동은 사이클론, 필터를 거쳐 미세분말과 공기를 분리시켜, 흡입 송풍기를 이용하여 공기만을 대기중으로 분출되도록 제작하였다. 연소실에 부착된 두개의 2차원으로 만들어진 평면노즐 출구면은 1차분류의 경우는 세로폭(D<sub>1</sub>), 가로(L)가 10mm, 200mm이고, 2차분류는 세로폭(D<sub>2</sub>) 5mm, 가로(L)200mm로 제작하였다. 사각연소실의 시험부는 가로, 세로, 길이 각각 200, 100, 550mm인 투명아크릴로 제작하였으며, 미세분말을 유도하기 위하여 시험부 후류부분의 상판을 25° 기울게 하여 미세분말을 제어하도록 설계하였다. Fig.2는 시험부의 세부도이며 H는 1, 2차 두 분류 중심사이의 높이차를 나타낸다.

실험은 1차분류가 유량계를 통과한 속도(U<sub>1</sub>: 15m/s)를 기준으로 Re=1.02×10<sup>4</sup>에서 수행하였다. 이때 2차분류가 통과한 유량계의 공기속도(U<sub>2</sub>)는 60m/s이고 두 분류의 중심축간의 높이차가 변화되도록 하였다.

실험에 사용한 미세분말은 구형도가 좋은 수지

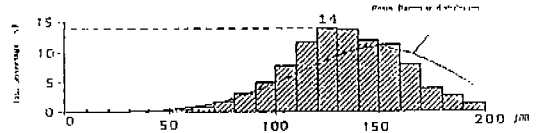


Fig. 3 Particle diameter distribution

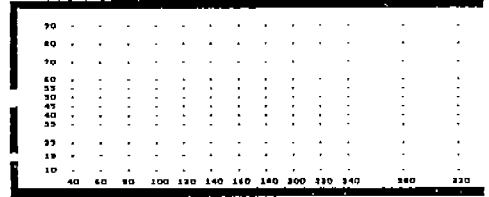


Fig. 4 Position of test points

입자를 표준망체로 체가름하여 0-200μm범위의 수지입자를 사용하였으며, Fig.3은 본 실험에 사용한 수지 입자경 크기의 분포도이다. 이 수지는 미세분말 공급기로부터 40.2kg/hr의 질량으로 공급된다. 측정영역은 노즐출구에 인접한 부근에서는 간격을 조밀하게 측정하였으며, 후류로 갈수록 점차 간격을 넓혀 X/D<sub>1</sub>=40까지 13×12 포인트를 속도 ±500m/s, 입자의 직경 0~10000μm 측정 가능한 DANTEC의 3차원 PDA에 의해 측정하였다. 측정된 데이터를 이용하여 연소실내의 입자의 속도장, 농도장 및 난류성분들을 분석하였다. Fig.4는 측정위치 및 범위를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig.5, 6 및 Fig.7은 두 분류의 높이차(H)가 0mm, 32.5mm, 47.5mm일때의 미세분말입자(0-50μm)가 공기와 혼합된 2상유동의 입자속도를 벡터장으로 나타낸 것이다. Fig.5는 1차분류만이 존재하는 경우로서 연소실 후류로 갈수록 입자의 속도는 점차 감소되며, 1차분류 중심이 되는 Y축 50mm인 중심보다 약 10mm 높은 60mm까지의 속도를 나타내고 있다. 높이차 32.5mm인 Fig.6은 2차분류 영향으로 연소실 초기영역에서의 유동의 변화가 크게 나타나고 있다. Fig.7은 높이차가 더욱더 커지게 되면 연소실 초기영역에서는 1차분류에 영향을 미치지 못하나 X축 후류로 갈수

록 입자의 속도가 빨라지며, 2차분류의 확산율이 점차 증가되면서 성장되는 현상을 보이고 있다. 성장율이 커질수록 약 Y축 60mm 이상에서의 입자의 역류속도도 급격하게 이루어진다. 이 영향으로 1차분류 방향이 중심축 하부로 기울어 지게 되어 연소실내에 와류영역을 형성하게 한다.

Fig.8,9 및 Fig.10은 Fig.5,6 및 Fig.7과 동일한 실험조건이나 입자의 크기가 0~200 $\mu$ m인 입자의 속도벡터장을 나타낸 것이다. 입자가 큰 경우도 역시 두 분류의 높이차가 커짐에 따라 입자경 0~50 $\mu$ m인 유동장과 정성적인 경향은 유사하게 나타나지만, 공기만이 분사되는 2차분류의 성장으로 1차분류에 혼합으로 이루어진 0~200 $\mu$ m 입자가 관성력 및 중력의 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

Fig.11은 1차 분류의 출구속도로 무차원 하여 중심위치인 Y축 방향 50mm에서 두 분류의 높이차 변화에 따른 입자속도를 나타낸 그림이다. 실험 1은 자유분류의 특성과 같이 1차분류가 분사된 후 주위유체의 유입현상으로 X/D<sub>1</sub>축방향으로 갈수록 입자속도가 점차 완만하게 감소하는 경향을 나타내나, X/D<sub>1</sub>축 15이후에서는 입자의 속도가 거의 같은 속도를 보이고 있다. 두 분류의 높이차가 증가함에 따라서 2차분류의 영향으로 실험2에서는 1차분류 중심축 속도가 급격한 감소율을 나타내며, X/D<sub>1</sub>축 14에서 입자의 속도가 0.5m/s로 최소값을 나타낸다. 2차분류가 직접적으로 영향을 미치는 영역을 벗어나게 되면 입자의 속도는 다시 점차 커지며, 두 분류차가 제일 큰 실험3에서는 1차분류의 입자속도가 오히려 2차분류의 영향을 적게

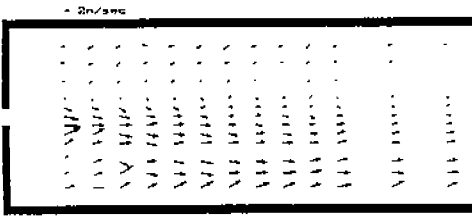


Fig. 5 0~50mm particle mean velocity in exp. 1

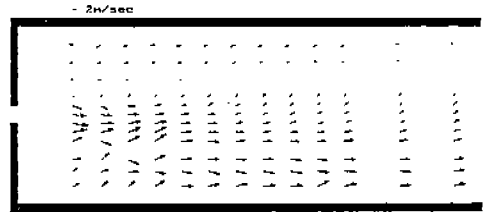


Fig. 8 0~200mm particle mean velocity in exp. 1

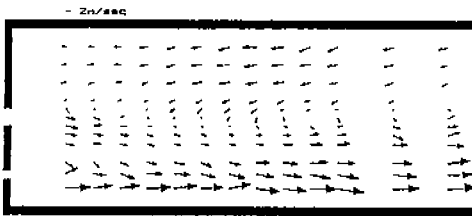


Fig. 6 0~50mm particle mean velocity in exp. 2

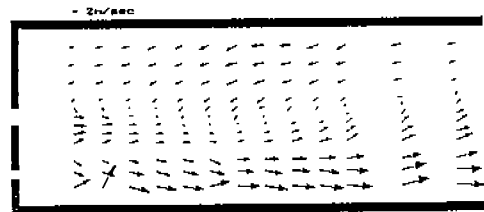


Fig. 9 0~200mm particle mean velocity in exp. 2

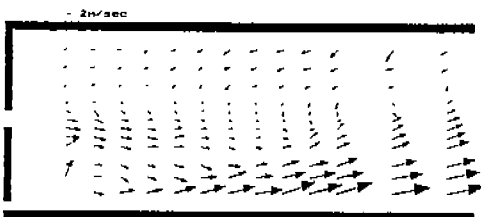


Fig. 7 0~50mm particle mean velocity in exp. 3

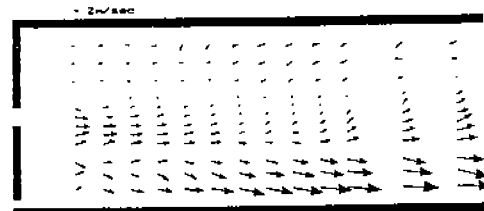


Fig. 10 0~200mm particle mean velocity in exp. 3

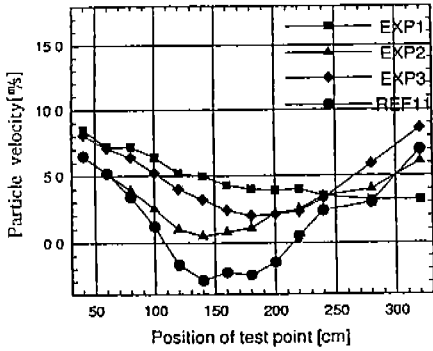


Fig. 11 Comparison of particle velocities on the central axis

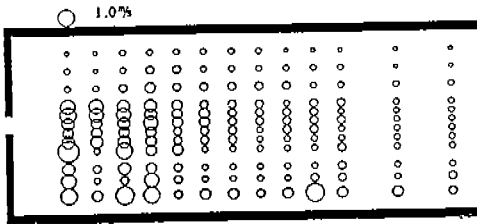


Fig. 12 Turbulent intensity in exp. 1

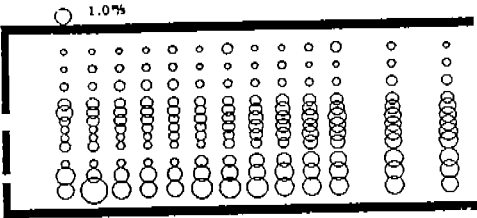


Fig. 13 Turbulent intensity in exp. 2

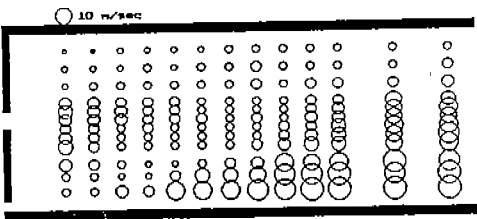


Fig. 14 Turbulent intensity in exp. 3

받아 Y축 50mm인 중심의 속도는 완만하게 감소되어 입자의 최소속도가 X/D<sub>1</sub>축 약20에서 나타났다. 이는 두 분류의 간격차가 32.5mm까지는 코안다효과의 영향이 크게 미치지나 간격이 47.5mm로

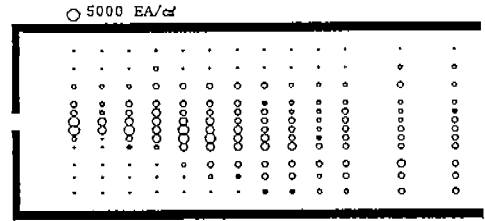


Fig. 15 Particle concentration in exp. 1

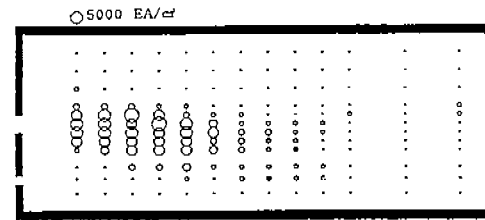


Fig. 16 Particle concentration in exp. 2

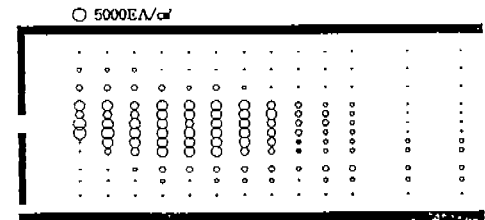


Fig. 17 Particle concentration in exp. 3

증가하면 코안다효과가 적게 나타나는 것으로 사료된다. 또, 김<sup>13)</sup>은 두 분류의 높이차가 실험2의 조건과 같으나 2차분류속도를 1차분류 공기속도보다 5배 큰 경우로서 1차분류 중심에서 입자속도는 두 분류의 높이차가 큰경우보다 더 급격하게 감소되어 약 X/D<sub>1</sub>축 12에서 부터 입자가 역류가 되는 음의 속도가 나타나고, X/D<sub>1</sub>축 약22부터 입자의 속도가 양의 속도로 나타난다. 이는 2차분류의 높이차 보다도 2차분류의 속도가 증가함에 따라 코안다 효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig.12, 13 및 Fig.14는 흐름방향과 반경방향의 파동속도(fluctuating velocity)를  $\sqrt{u'^2+v'^2}$ 로 정의한 입자의 난류강도를 나타낸 것이다. Fig.12는 1차혼합유동이 분사되는 경우로서 연소실 내부의 주위공기의 유입현상으로 노출인접한 부근에서 입자의 난류강도가 다소 크나 후류로 진행할수록

점차 작아지며, X축 각단면의 난류강도 크기가 비슷한 경향을 나타내나, 두 분류의 높이차가 커지는 Fig.13, 14에서는 2차분류가 확산, 성장되는 영역 내에서 1차분류 입자의 운동량교환이 활발하여 난류강도가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig.15,16 및 Fig.17은 각 실험의 연소실내 측정 위치에서 단위체적당 입자의 농도분포를 나타낸 것이다. 실험1은 1차분류의 성장으로 연소실내 초기영역에서는 입자의 농도가 농후하나 후류로 갈수록 점차 희박해지면서 각 단면에서 고른 분포를 나타내나, 두 분류의 높이차가 증가함으로써 연소실내에 재순환영역이 형성되어 1차분류 입자가 정체되어 농후해지는 부분이 뚜렷하게 나타난다. 이는 Fig.11에서의 두 분류의 높이차가 증가함에 따라 1차분류 중심에서의 입자속도가 크게 감소하여 발생한 와류현상으로 인한 재순환영역과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정할 수 있다. 실험2의 경우 1차분류 중심에서의 입자의 속도가 X축140cm에서 최소의 속도를 나타낸 곳까지 입자의 농도가 농후하며, 실험3의 경우에서도 1차분류 중심에서의 입자의 속도가 최저인 X축 200cm 부근 까지 농도가 농후하다. 이는 높이차가 클수록 1차분류 중심에서의 입자의 속도의 변화에 따라서 농도가 농후한 영역이 넓어진 것으로 사료된다. 연소실내의 농도상태에 따라 연소시 생성되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

높이가 다른 두 개의 노즐로부터 분사되어 혼합되는 연소실내의 이상 유동에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 분류의 높이차가 증가 할수록 연소실내의 재순환 영역과 농후한 영역이 넓어진다.
2. 연소실 중심부 농도는 재순환 영역의 영향을 받아 입자의 속도가 느려져서 농도가 농후하게 나타나며, 분류의 높이차로 연소실내의 농도를 조절할 수 있다.
3. 입자의 난류강도는 농도가 농후한 곳에서 작으나, 2차분류의 공기의 영향을 받아 농도가 희박한 곳에서는 크게 나타난다.

#### 후 기

본 연구는 여수대학교 설비자동화 및 정보시스템 연구개발센터 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Neilson, J. H and Gilchrist, A, 1968, "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.
- (2) 박영철, 손재익, 1992, 석탄가스 탈황기술 개발현황", *Energy R&D*, Vol.14, No.1, pp.198~212.
- (3) 김종영,김종진, 1995, 석탄가스화 복합발전기술특성", *대한기계학회지*, Vol.35, No.12, pp.1114~1132.
- (4) Yuan, J. W., Xu, M. H., Sheng, C. L. and Han, C.Y., 1995, "Combustion of High Concentration Pulverized Coal and Left-right Dense-thin Phase Technique", *中國電力*, 第1期, pp.31~35.
- (5) Chuan, W.B., 1995, "四角切向燃燒 煤粉鍋爐燃用无烟煤的 可行性分析", *Power Engineering*, Vol.15, No.4, pp.20~26.
- (6) Chuan, W. B., 1995, "Analysis on the Dense-thin Separation Combustion Technology of Pulverized Coal", *中國電力*, 第7期, pp.33~36.
- (7) Shi, X. F., Qian, R. Z. and Xiao, P. H., 1995, "개봉분체와 둔체 PDA 측량 및 저휘발분 매분열태대비적 시험연구", *Power Engineering*, 제15권, 제2기, pp.19~22.
- (8) Shakouchi, T. and Ichikawa, A., 1991, "Analysis of Gas-particle Two-phase jet over a Cylindrical Surface : Diffusion of Solid Particles", *Gas-Solid Flows ASME*, Vol.121, pp.71~76.
- (9) Shakouchi, T., Onsoheru, Y. and Kato, S., 1989, "Analysis of a Two Dimensional, Turbulent Wall Jet Along a Circular Cylinder", *JSME International Journal*, Vol.32, No.3, pp.332~339.
- (10) PDA Inatallation and User's guide, DANTEC.
- (11) 김정훈, 1998, 사각연소실내의 2상 난류 유동에 관한 연구" 여수수산대학교 석사학위논문