

석탄 노즐내 미분탄 분리장치의 입자 분리 효과에 관한 실험적 연구

김혁제* · 송시홍* · 이건명** · 김상현** · 이익형**

An Experimental Study on the Separating Effect of Pulverized Coal at Coal Nozzle with Coal Separator

Hyuk Je Kim, Si Hong Song, Gun Myung Lee, Sang Hyeun Kim and Ik Hyung Lee

Key Words : Pulverized Coal(미분탄), Coal Nozzle(석탄 노즐), Coal Separator(미분탄 분리장치)

Abstract

Recently, according to increase in the requirement of electric power, a thermoelectric power plant equipped with pulverized coal combustion system is highly valued, because coal has abundant deposits and a low price compared with others. For efficient use of coal fuel, most of plant makers are studying to improve combustion performance and flame stability, and reduce pollutant emission. One of these studies is how to control the profile of particle injection and velocity dependant on coal nozzle. Basically, a mixed flow of gas and particle in coal nozzle is required to have appropriate injection and concentration distribution at exit to achieve flame stability and low pollutant, but it is very difficult to obtain that without help of a coal separating device within nozzle. In this study, each distribution of air and coal flow rate is measured for the coal nozzle with coal separator developed by us. The coal concentration at exit is various according to inlet swirl values and positions of coal separator. Also pressure drop is measured for various operating conditions of this nozzle. From these results, we can find the separation characteristic of new developed coal separator, and select proper operation range of coal nozzle. When this coal nozzle is applied to actual plant, these investigations will be very useful to confirm the shape of coal separator to have efficient particle injection.

기호설명

- | | |
|---|--------------------------|
| A : 출구단면 면적[m ²] | φ : Swirl vane angle[°] |
| C : 미분탄 출구농도[kg/m ³] | <하첨자> |
| D _s : 선회기 부착부 노즐 내경[mm] | 1 : 내측 |
| D _h : Vane pack hub diameter[mm] | 2 : 외측 |
| L _{CS} : 벤츄리 목부끝단과 coal separator 사이거리 | |
| L _{VD} : 벤츄리 확대부 거리 | |
| Δ P : 노즐모델내 압력 강하량[mmAq] | |
| S : 선회수(swirl number)[-] | |
| \bar{V} : 평균속도[m/s] | |
| <그리스 문자> | |
| α : 출구 미분탄 분리율[%] | |

1. 서론

최근 세계적으로 전기에너지의 수요는 폭발적인 증가 추세를 보이고 있으며 이에 따라 전력 생산을 위한 화력발전소의 필요성은 더욱 높아지고 있다. 특히 대부분의 대형 화력발전소는 가스 및 액체 연료보다는 매장량이 풍부하고 단가가 낮은 석탄을 주 연료로 사용하여 미분탄기(pulverizer)로 미세 분말화 한 후 연소기로 이송하여 화로로 분사 시키는 시스템을 채택하고 있다. 따라서 미분

* 정회원, 두산중공업 기술연구원

** 비회원, 두산중공업 기술연구원

탄 연소시스템을 사용하고 있는 석탄연소설비의 대부분은 연소효율개선 및 화염 안정성 확보를 위한 목적으로 적절한 연료 분사 시스템 및 산화제 공급 방식을 갖춘 연소장치를 필요로 하며, 이에 따라 선진사에서는 이러한 요구에 적합한 미분탄 버너의 개발에 주력하고 있다. 특히 화로 내에 분사되는 연료의 분포에 따라 연소성능 및 화염구조에 큰 영향을 미치므로 미분탄류를 적절하게 공급할 수 있는 미분탄 분사노즐의 개발은 더욱 중요시되고 있다.

따라서 석탄연소설비를 제작하고 있는 미분탄 버너 제작사에서는 각 사별로 고유한 모델의 미분탄 버너를 개발하고 있는데, 대표적으로 Foster Wheeler Engineering Co.(F.W.), Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.(IHI), Babcock & Wilcox Co.(B&W) 및 HITACHI 등이 있다. 각 사의 미분탄 버너별 특징을 살펴보면, 산화제 공급 방식에는 큰 차이가 없지만, 연료공급방식에 있어서 F.W. 및 IHI는 미분탄 도관을 미분탄 노즐의 접선방향으로 연결하는 접선(선회)유입방식을 채택하고 있으며, B&W 및 HITACHI는 도관과 미분탄 노즐을 직접 연결하여 직각 곡관(90° elbow) 형태를 지닌 직접유입방식을 채택하고 있다. 전자는 미분탄류의 선회유입에 의해 노즐내부의 마모 및 선회수(swirl number) 변화에 따른 출구부 불균일 분포를 유발하는 문제로 인해 내부에 마모방지장치 및 출구부 선회 억제용 정류판(straightener)⁽¹⁾ 등의 부가설비를 추가하고 있다. 후자는 도관을 통해 유입된 미분탄류가 노즐의 곡관부 통과 시 미분탄 입자에 작용하는 원심력에 의해 곡관 바깥쪽으로 편중되는 문제점이 있다. 따라서 직접유입방식을 채택한 버너 제작사에서는 편중방지장치로 노즐 상부 디플렉터(deflector)와 중앙부의 원뿔 디퓨저(conical diffuser)⁽²⁾ 등을 장착하고, 화염안정화를 위해 끝단에 보염링(flame stabilizing ring)⁽³⁾ 등을 장착하고 있다. 또한 노즐 출구에서 분사되는 미분탄의 농도분포는 화로 내 연소공기와 혼합성, 초기 착화성, 화염안정성, 화염구조 및 공해물질 배출특성에 중요한 영향을 미치므로, 각 버너 제작사에서는 출구 미분탄 농도조절 수단으로 치형 또는 유선형의 농도조절링⁽⁴⁾과 부분적인 미분탄 과농 및 회박 분사를 가능토록한 장치⁽⁵⁾ 등을 노즐 내부에 장착하고 있는 추세이다. 최근 두산중공업(주)은 노즐 출구 미분탄 농도조절을 위하여 일반적인 벤츄리 형상의 노즐에 cyclone separator의 원리⁽⁶⁾를 응용한 coal separator가 장착된 석탄노즐을 개발하고 있다.

실제로 노즐내 미분탄류 즉, 공기와 미분탄의 혼합류의 거동은 분체유동(particulate flow)의 일종으로, 기류와 입자간 운동이 3차원적 불안정한 흐름을 갖는 복잡성으로 현재까지 이론적으로 명확하게 규명되지 않아 많은 연구가 실험적인 방법에

의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 두산중공업(주)에서 설계된 coal separator가 장착된 석탄노즐에 대해서 노즐내 미분탄 분리특성에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 이를 위하여 coal separator의 위치변화 및 입구 선회수 변화에 따른 노즐 출구 속도 및 미분탄 농도분포를 측정하였다. 아울러 노즐내 압력 손실량을 동시에 측정함으로써, 미분탄 및 1차공기 분리에 미치는 주요 영향인자를 조사하고 적절한 운전범위를 제시하여, 향후 실 플랜트 적용시 미분탄의 최적 연소를 위한 노즐 형상 확정 및 효율적인 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구는 사업용 발전설비의 핵심 연소 기기인 미분탄 버너 중 화로 내 분사되는 미분탄류 농도 조절을 위한 석탄노즐의 개발을 위해 수행된 것으로, 이용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타났다. 각 부분은 크게 입자 공급부, 노즐 모델부, 속도 측정장치, 입자샘플링 장치 및 집진장치 등으로 구성되어 있다.

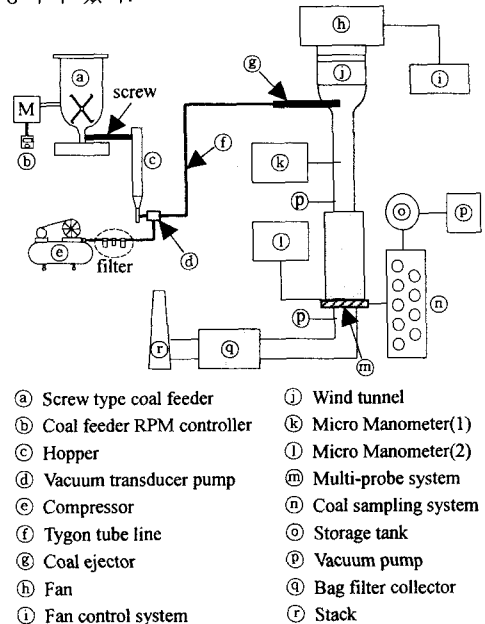


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus

본 실험에 사용된 송풍시스템은 터보 팬(turbo fan)과 개방형 아음속 풍동(open type subsonic wind tunnel)으로 구성되며, 풍동의 전체 길이는 4,144mm, 실험 구간은 218mm의 원형 덕트이다. 공기는 3상 교류 전동기(22Kw)로 구동되는 터보 송풍기에 의해서 흡입 되어 확대부(diffuser)를 통

과한다. 확대부를 지난 공기는 honeycomb duct 와 미세한 mesh duct 를 지나 축소부(contraction body) 를 통과하면서 균일 유동 분포를 이룬다. 실험 구간에서의 속도는 최대 56m/s 까지 회전수 조절기 (inverter)로 조절 가능하며, 자유 유동 난류 강도는 1% 이하이다.

입자 실험을 위해 본 실험 모델 출구에 유동 및 입자 분포를 측정할 수 있도록 구성하였다. 또한 입자 후 처리를 위해 Bag filter 집진장치를 이용하였다. 입자 실험 장치 각 구성품의 용도 및 제원을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

• Sampling Probe

측정 위치에서 입자 포집을 위한 유량을 샘플링하며, 내경은 3mm 이다. 아울러 재질은 stainless steel 이며 모든 probe 의 길이는 일정하게 설계, 제작하였다.

• Filter Holder

확산실 상단과 하단 사이에 filter 를 고정 시켜 주고, filter 전 단면에 균일한 유동을 분포 시키는 역할을 한다. 그리고 filter holder 하단부에는 filter 의 압력 손실 증가로 인한 filter 의 변형을 막기 위한 stainless steel screen 이 설치 되어 있다. 본 실험에서 사용된 filter holder 는 내부 직경이 47mm 이며, 재질은 알루미늄으로 BGI Incorporated 제품을 사용하였다.

• Filter

입자 포집을 위해 사용된 filter 는 직경이 47mm 인 glass fiber filter type 이며, Table 1 에 본 실험에 사용된 filter 의 사양을 나타내었다.

Table 1 Specifications of glass fiber filter

포집 효율 (0.3 μ m DOP%)	두께 (μ m)	중량 (g/m ²)
99.9	350	80

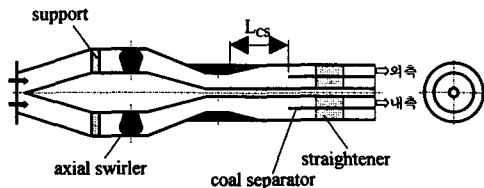


Fig. 2 Schematic diagram of coal nozzle model

본 실험대상으로 이용된 모델은 Fig. 2 에 나타냈으며, 주 재료를 아크릴로 사용하여 제작하였다. 본 노즐은 실제 석탄 1500kg/h 를 연소시킬 수 있는 실 스케일 규모이며, 주요 구성은 유입부에 선회를 발생시킬 수 있는 가변형 축류 선회기 8 개, 그 후단에 벤츨리부, 미분탄 분리를 위한 coal separator 및 선회억제를 위한 straightener 로 이루어져 있다. Coal separator 는 수평방향으로 이송이 가능도록 제작되어 벤츨리 목부 끝단부터 coal

separator 사이의 거리 L_{CS} 를 변경할 수 있도록 설계하였다. 또한 노즐 출구단면에서 coal separator 를 기준으로 바깥쪽 환형부분(외측) 및 안쪽 환형부분(내측)의 면적비는 1:1 로 고려하였다.

2.2 실험방법

미분탄 버너 노즐의 속도를 측정하기 위해서 본 실험에서는 digital manometer 와 L-type pitot tube 를 이용하였다. 본 실험에서 사용한 Digital manometer 의 측정 최대 속도 및 압력은 각각 56 m/sec 와 ± 199.9 mmH₂O 이며 장비의 허용 오차는 $\pm 1\%$ 이다. 각 노즐별로 유량 측정은 모델 전방 1000mm 떨어진 거리에서 입구관의 center point 에서 수행하고, 출구 속도 분포 측정은 노즐 끝단부터 5mm 떨어진 거리에서 측정하였으며, 그 측정 위치는 원주방향으로 45° 간격, 반경방향으로 12mm 간격으로 노즐 끝단면에 대해서 중심 포함 총 33point 를 측정하였다.

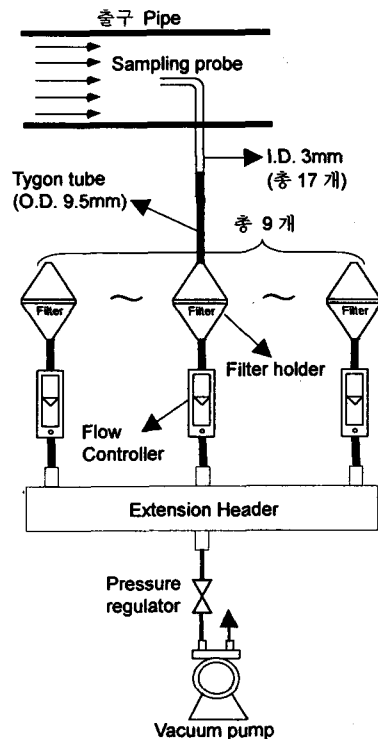


Fig. 3 Schematic diagram of filtering system for coal sampling

노즐 출구에서 내, 외측의 위치별 미분탄 농도 측정은 multi-probe system 을 통하여 유입된 미분탄류(air+coal)를 glass fiber filter 가 장착된 입자 포집 장치에 의해 일정 시간동안 필터에 모아진 미분탄의 질량을 측정함으로써 얻을 수 있었다. 즉,

sampling probe 를 통하여 일정한 유량을 일정 시간 동안 filter holder 에 유입 시키면, filter holder 내부에 설치되어 있는 필터에 입자가 포집된다. 이때 filter holder 후단부에 유량계와 진공 펌프를 설치하여 필터를 통과하는 유량이 일정하게 유지되도록 하였다. 입자 포집 전, 후의 필터 질량은 분석용 천칭(Leo-250 Analytic Balance)을 이용하여 측정한다. 필터 실험 장치는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 주요 구성은 multi-sampling probe, filter holder, filter, 유량계, 압력 regulator 그리고 진공 펌프 등으로 이루어져 있다.

특히 필터를 이용한 입자 측정 실험에서는 샘플링 유량, 샘플링 시간, 실험 환경(온도, 습도) 그리고 필터 질량의 정확한 측정이 실험 결과의 신뢰성을 결정하기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 sampling probe 를 노즐 끝단면에서 5mm 를 띄웠으며, 샘플링 유량은 isokinetic sampling 만족하도록 측정 위치에서의 속도와 샘플링 프로브(sampling probe) 내부의 유속이 일치하도록 하여 실험을 수행하였다. 아울러 샘플링 시간은 10분으로 하였고, 샘플링 프로브와 필터 사이에 입자 이송 시, 정전기에 의한 입자 손실을 최소화 하기 위해서 연결 튜브는 tygon tube 를 사용하였다. 또한 filter 는 실험실 내에서 24시간 이상 방치하여 실험실내의 온도 및 습도 조건이 같은 상태에서 실험에 사용하였다.

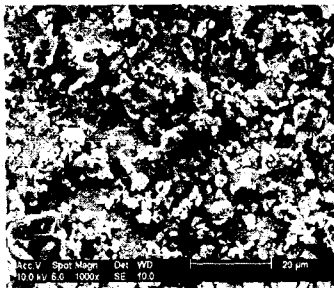


Fig. 4 Pulverized coal shape

본 연구에서 이용된 실험용 입자는 실제 국내 석탄발전소에서 사용중인 역청탄(bituminous coal)인 호주탄을 이용 하였다. 전자 현미경을 이용하여 확대한 석탄입자의 형상은 Fig. 4에 나타냈다. 실제 발전소의 버너 전단 pulverized coal 과 같은 실험 조건을 유지하기 위해서 고온 건조기(dry oven)에서 78 °C의 일정한 온도 조건하에 장시간 가열, 건조 후 실험에 이용하였다.

본 실험에서 미분탄 입자는 screw type feeder 를 통하여 공급하는데, feeder 는 입자를 담아주는 용기와 이 용기내 입자의 교반을 위한 교반기로 구성되며, screw 의 회전에 의해 원추형의 hopper 아

래로 분산되어 자유 낙하하게 된다. 이렇게 자유 낙하한 입자들은 진공 형성 펌프(vacuum transducer pump)를 통하여 노즐모델 전단으로 분사된다. 이때 모델 내로 분사되는 coal 의 균일분포를 위해 자체 개발한 coal ejector 를 사용하였다. 분사되는 양은 RPM controller 에 의해 조정되는 Screw 의 회전속도에 따라 조절할 수 있으며, Fig. 5에 본 실험에서 이용된 feeder 의 회전수에 따른 입자공급량의 관계를 나타내었다.

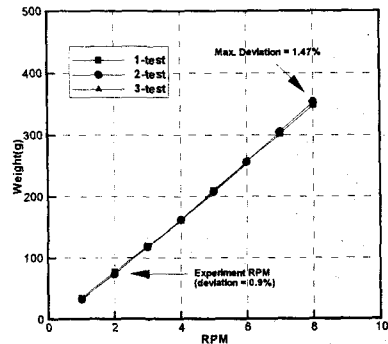


Fig. 5 Calibration curve of coal feeding rate

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험조건

본 실험에서 사용된 미분탄 입자의 size 분포는 Fig. 6에 나타냈으며, 75 μm이하가 90%이상을 차지 하였다. 이 미분탄의 진비중은 1400kg/m³ 이고, feeding 양은 750g/min 으로 일정하게 공급되며, 이는 실제 연소시에 비해 약 1/1000의 공급량이 된다.

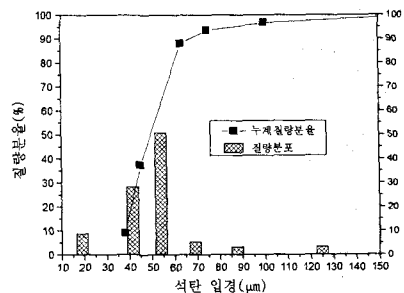


Fig. 6 Pulverized coal size distribution

본 연구에서는 유입부 선회수단으로 axial swirler 를 고려하였다. 이 axial swirler 는 노즐 입구에 유입된 미분탄류에 선회를 발생시킴으로써, 석탄 입자에 원심력을 일으키는 역할을 한다. 따라서 선회기 후단의 입자는 노즐 중심에서 멀어지려는 경향을 갖는다.

일반적으로 axial swirler 에서 베인(vane) 각도에 따른 vane 후단의 선회수(swirl number)는 다음식 (1)에 의해 계산될 수 있다⁽⁷⁾.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_h/D_s)^3}{1 - (D_h/D_s)^2} \right] \tan \phi \quad (1)$$

where, D_s = nozzle diameter
 D_h = vane pack hub diameter
 ϕ = vane angle

본 실험 모델에 대해 식 (1)을 적용하여 계산하면 vane 각도에 따른 선회수를 계산할 수 있다. 본 실험에서는 vane 각도 10, 25, 40 및 60° 에 대해 수행하였고, 이때 각각의 선회수는 0.14, 0.37, 0.66 및 1.36 이다.

Coal separator 는 Fig. 7 과 같이 L_{CS} 를 변경할 수 있는데 본 연구에서는 L_{CS}/L_{VD} 가 0.37, 0.68, 1.00 및 1.63 인 위치에 대해 실험을 수행하였다.

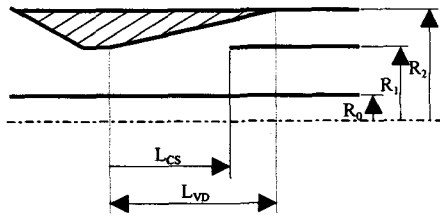


Fig. 7 Schematic diagram to define coal separator position

3.2 유입부 선회수 변화에 따른 영향

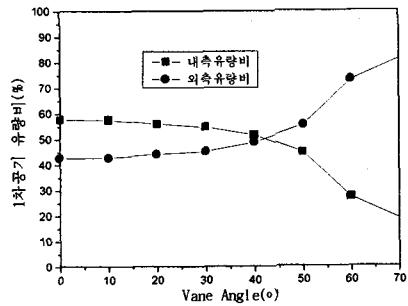
모델 입구에 선회가 없는 경우 대부분의 유동 및 미분탄 입자는 벤틀리 목부를 지나면서 내측으로 집중된다. 그러나 선회수가 증가하면 유동 및 입자는 원심력의 영향으로 외측으로 집중하는데, 이때 관성력이 큰 입자의 경우 원심력의 영향을 더욱 크게 받는다⁽⁸⁾. 다음 식 (2), (3)은 원심력을 받은 입자가 coal separator 를 지나면서 내, 외측으로 분리될 때의 각 질량 분율을 계산하는 식이다.

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 m_{1,i}}{\sum_{i=1}^8 m_{1,i} + \sum_{i=9}^{16} m_{2,i}} \times 100(\%) \quad (2)$$

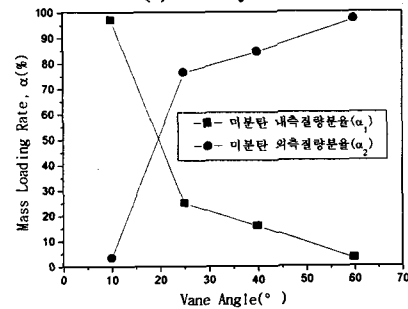
$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=9}^{16} m_{2,i}}{\sum_{i=1}^8 m_{1,i} + \sum_{i=9}^{16} m_{2,i}} \times 100(\%) \quad (3)$$

Vane 각도가 증가함에 따라 외측으로 집중되는 경향은 Fig. 8 에 잘 나타난다. (a), (b)는 coal separator 의 위치 L_{CS}/L_{VD} 가 1.63 인 경우 vane 의 각도 증가에 따른 노즐 출구 내, 외측 공기분리율 및 미분탄 질량분율을 나타낸 것이다. 이때 노즐

모델에 유입되는 유량은 상온에서 2822 m³/h 로, Fig. 8 의 경우 모든 측정점을 산술 평균한 속도값 으로부터 얻은 유량과의 오차는 5%이내가 된다.



(a) Primary air



(b) Pulverized coal

Fig. 8 Air flowrate and Mass loading rate at nozzle exit for vane angle when $L_{CS}/L_{VD} = 1.63$

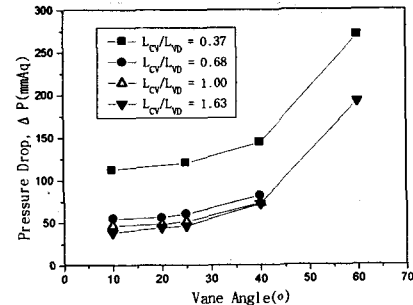


Fig. 9 Pressure drop within nozzle for vane angle

실험 case 별로 노즐내 유동이 다르기 때문에 내부의 압력 손실량은 차이가 난다. 노즐부의 과도한 압력 강하는 PAF(Primary Air Fan)의 용량증가 및 연계시스템의 사양 결정시 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로, 노즐모델의 입출구 정압을 액주계를 이용하여 측정하고 그 차이를 노즐부 압력 강하량 (ΔP)으로 하였다. Vane 각도에 따른 노즐 모델내 압력 강하량을 Fig. 9 에 도시하였다. 각도가 커질수록 압력손실도 커짐을 알 수 있으며, 특히 vane 각도 40° 이상에서는 압력손실이 급격히 증가함을

알 수 있다.

3.3 Coal Separator 위치에 따른 영향

노즐내 미분탄의 농도조절수단으로 본 연구에서 고려된 coal separator는 그 위치를 변경함으로써 원심력의 영향을 받은 coal 및 공기를 노즐출구의 내측 혹은 외측으로 분리하게 된다. Coal separator의 위치변화에 따른 외측으로 분사되는 공기량 및 coal 양 측정결과를 Fig. 10에 도시하였다. Coal separator가 벤츄리 목부에서 멀어질수록 공기량은 외측으로 서서히 증가하는 경향을 보여주지만, coal은 급격히 증가 후 완만해지는 경향을 보여준다. 또한 coal에 비해 공기량은 vane 각에 덜 민감한 반응을 보이는데, 이는 공기에 비해 밀도가 약 1000 배정도 되는 coal의 관성력이 크기 때문으로 여겨진다.

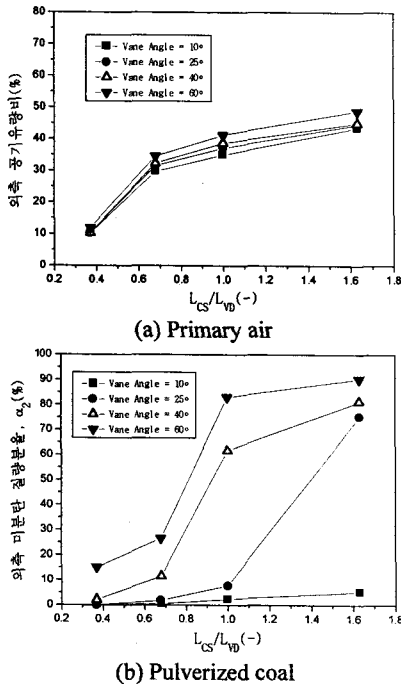


Fig. 10 Percent mass flow of air and coal to outer zone at nozzle exit

4. 결론

본 연구에서는 노즐 출구에서 분사되는 coal 및 primary air의 분포를 조절하기 위하여 고려된 coal separator의 분리특성에 대한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 노즐입구의 선회수(vane 각도)가 증가할수록 공기는 약 50° 부터 외측으로 급격히 증가

하나, 석탄입자는 25°까지는 급격히 증가하고 25° 이상에서는 완만히 증가한다.

- (2) Coal separator가 벤츄리에서 멀어질수록 공기는 외측으로 완만히 증가하나, 석탄입자는 급격히 증가 후 다시 완만해지는 특성을 보여준다.
- (3) $L_{cs}/L_{vb} = 0.37$ 이상인 위치에서 노즐내 압력 강하량은 주로 입구 vane 각도에 의한 영향이 크며, vane 각 40° 이상에서는 급격히 증가하는 경향을 보여준다.

후기

본 연구는 국립환경연구원의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Oba, K., Kimoto, M., Ikeda, M., Tsuji, H., Makino, H. and Kiga, H., 1996, "Improvement of Low Load Combustion Stability for the New Low NOx Pulverized Coal Burner", 일본중앙전력연구소 보고서, Part 4.
- (2) Abele, A. R., Kindt, G. S. and Payne, R., 1989, "Field Evaluation of Low-Emission Coal Burner Technology on Utility Boilers", 2nd Generation Low-NOx Boilers, Vol. 2.
- (3) Tadahisa, M. and Shigeki, M., 1985, "Low NOx Combustion Technology for Pulverized Coal Fuel", Hitachi Review, Vol. 34, No. 5.
- (4) Tadashi, I., Hideki, Y., Shigeki, M. and Hiroshi, K., 1992, "Advanced Technology for Coal Fired Boilers", 日立評論, vol. 74 No. II.
- (5) J. Vatsky, 1993, "Addressing The Nitrogen Oxide Problem Via Fuel Flexibility and Multi-Fuel Low NOx Burners", Power-Gen Europe '93.
- (6) A. C. Hoffmann, A. van santen, R. W. K. Allen and R. Clift, 1992, "Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones", Power Tech. vol. 70 pp.83~91.
- (7) A.K. Gupta, D. G. Lilley and N. Syred, 1984, "Swirl Flows", ABACUS Press.
- (8) H. J. Kim, S. H. Song and S. H. Park, 2000, "A Numerical Study for Optimum Configuration of Pulverized Coal Nozzle to Prevent Uneven Distribution of Particle", 대한기계학회논문집 B 권, 제 24 권 제 2 호, pp. 270~279.