

입자분리기 최적 설계를 위한 다상 유동 해석

육심균[†] · 류제욱* · 이익형* · 이상룡**

(2003년 4월 22일 접수, 2003년 8월 18일 심사완료)

Analysis of Gas-Solid Flow for the Optimum Design of Coal Splitter

Simkyun Yook, Jaewook Ryu, Ikhyeong and Sangryong Lee

Key Words : Boiler(보일러), Coal Splitter(입자분리기), Pulverized Coal(미분탄), Pollution Minimum Burner(버너), NO_x(질소산화물), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)

Abstract

The experimental investigation of a coal splitter used in the 500MW(e) boilers of fossil power plant is carried out to validate the design criteria. To predict air flow and the amount of particles at the exit, velocity and the weight of particles are measured on test planes using the coal splitter model with two-dimensional phase doppler particle analyzer and the glass fiber filter. It is found that the position of guide plate influences significantly both flow rates of gas and particle at the exit. Gas flow rate was a linear function of the guide plate, whereas particle flow rate was a exponential function of it.

기호설명

- D : 미분탄 입경
- L : 특성길이
- M : 질량분율
- N : 확장계수
- V : 입구속도
- Y : Guide Plate 이동거리
- Re : 레이놀즈 수
- St : 스톡스 수
- AFR : 공기질량유량비 (Air Flow Ratio)
- PFR : 입자질량유량비 (Particle Flow Ratio)

하첨자

- g : 유동
- p : 입자
- R : 기준값

[†] 책임저자, 회원, 두산중공업㈜ 기술연구원
 E-mail : yooksk@doosanheavy.com
 TEL : (055)278-3751 FAX : (055)278-8593

* 두산중공업㈜ 기술연구원

** 경북대학교 기계공학부

1. 서론

화력발전소에서 석탄 연소 후에 발생하는 연소 생성물은 환경오염이라는 심각한 부작용을 유발한다. 따라서 최근의 발전 설비는 환경 규제 측면과 효율향상을 동시에 만족시키기 위한 여러 형태의 기술이 개발되고 있다. 이러한 기술 중에서 PM (Pollution Minimum)버너는 CRS(Coal Rich Stream)와 CLS(Coal Lean Stream)을 만들어 보일러 노 내부에서 연소토록 함으로써 효과적으로 질소산화물(NO_x) 생성을 감소시키는 방법으로 알려져 있다.

입자분리기(coal splitter)는 화력 발전소의 석탄 연소 장치에 PM 버너를 사용할 경우, 버너로 공급되는 미분탄(pulverized coal)과 공기 혼합물을 CRS와 CLS로 분리시켜 주는 장치이다. 입자분리기의 초기 기본 설계는 미쯔비시중공업(MHI)에서 200MW 용량에 대해 설계가 이루어졌으며, 형상은 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 Y-분기형태로 하나의 입구에서 두개의 출구로 분리되어 있다.

입자분리기의 설계조건은 출구질량유량에 대한 입구질량유량 비로 정의 된다. 즉, 하위출구 기준으로 공기 질량비(하위 출구 공기 유량/입구 공기 유량)는 50%이지만 미분탄 질량비(하위 출구 질량

유량/입구 질량유량)는 70%이다. 즉, CRS 는 하위 출구이다. 이와 같이 공기 질량비는 상하위 출구에서 5:5 로 같지만 미분탄 질량비는 상위 출구와 하위출구에서 3:7 의 비로 서로 다르다. 이와 같이 미분탄과 공기 혼합물을 CRS 과 CLS 으로 분리시켜 주는 목적은 다단 연소(fuel staging)를 통해서 석탄 연소 시 발생하는 질소 산화물 생성을 최소화 시키기 위함이다. 따라서, 최근에 건설되고 있는 석탄화력발전소는 환경 규제문제가 심각히 부각됨에 따라 대부분 PM 버너가 채택되고 있는 실정이다. PM 버너를 채택 할 경우 입자분리기의 성능은 연소 효율 및 질소 산화물 저감과 직결 된다고 볼 수 있다.

현재 각 업체에서는 보일러 용량변화(500MW)에 따라 성능 검증 없이 단순히 기하학적으로 확대 제작하여 사용되고 있는 실정이다. 입자 분리기 크기가 증가하는 경우에는 미분탄과 공기 운동 특성은 초기 입자분리기(200MW)의 운동 특성과 상이할 것으로 판단되며, 결국에는 설계조건 만족여부에 의문점이 발생된다.

따라서, 본 연구에서는 당사에서 기 제작/설계한 입자분리기(500MW)의 설계조건 만족 여부를 파악 하고, 만약 설계조건을 만족하지 못할 경우에는 형상변경을 통하여 설계조건을 만족하도록 설계를 개선하는 것이 목적이다. 이를 위하여 국내 화력 발전소에서 실제 사용되고 있는 입자분리기를 1/2 축소된 실험 모델을 제작하여 유동 및 입자 해석을 수행하였다.

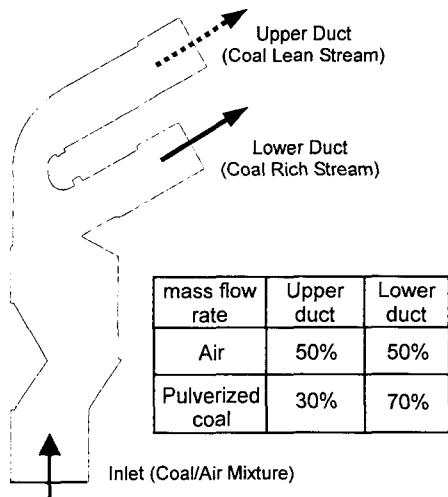


Fig. 1 Geometry and design conditions of coal splitter

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 모델 및 풍동

본 실험에 사용된 풍동은 아음속 개방형 풍동으로 풍동 전체 길이는 5,530mm 이다. 풍동의 출구 크기는 256mm x 256mm 인 정사각형이며, 풍동 출구의 최대 속도는 30m/s 로서 인버터에 의해 조절이 가능하다.

실험 모델은 500MW 급 화력발전소에 사용되는 입자분리기를 1/2 로 축소하여 투명 아크릴로 제작 하였다. Fig. 2 는 속도 측정 단면(test section) 및 측정 좌표계를 보여주고 있다. 좌표계는 주유동 방향을 X 축, 높이 방향을 Y 축, 폭 방향을 Z 축으로 설정하였다. 입자분리기 모델은 guide plate, guide bump 및 2 개의 출구 덕트로 구성되어 있다. 특히, guide plate 는 출구 덕트에서 유동을 조절하기 위하여 이동이 가능하도록 제작하였다. 입자분리기는 석탄 입자에 의한 마모가 심하게 발생하는 부분에 세라믹을 부착하여 내부 단면을 보호하는데, 실험 모델에서도 다상 유동 실험시 실제와 같은 조건을 만들어 주기 위해 모델 내부 단면에 두께가 10mm 인 세라믹을 부착하였다.

2.2 실험모델의 상사성

입자분리기는 공기와 미분탄이 혼합된 상태에서 작동이 되므로, 실험 모델을 제작할 경우에는 원형과 모델 사이의 상사성이 고려되어야 한다. 즉, 유체의 흐름과 입자의 운동 특성에 대한 상사성이 동시에 만족되어야 하며, 이러한 조건을 만족하기 위해서는 무차원 변수인 레이놀즈 수(reynolds number, Re)와 스톡스 수(stokes number, St) 값이 같아야 한다. 입자의 거동을 지배하는 스톡스 수는 입자의 공기 역학적인 응답시간(particle aerodynamic response time)에 대한 시스템의 응답시간(characteristic time of the fluid phase)비로 표현된다.

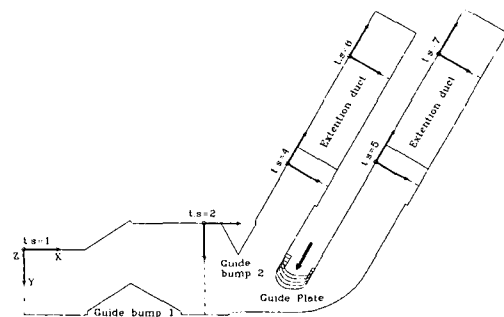


Fig. 2 Measuring positions and coordinates system

Table 1 은 실험 조건에 따른 무차원 변수 값을 나타내었으며, 특성길이(L)은 입자분리기 모델의 입구 높이를 기준으로 하였으며 256mm 이다.⁽¹⁾ 본 연구에서 사용된 실험모델과 원형의 상사성을 검토하여 보면, 먼저 레이놀즈 수는 10⁵ 이상이므로 충분한 난류 유동이고, 스톡스 수는 원형과 모델에서 거의 같은 값을 가지므로 상사성이 충분히 만족되는 것으로 판단된다.

2.3 유동 실험

본 실험에서는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 입자분리기 내부 속도를 측정하였으며, 실험에 사용된 PDPA 제원을 Table 2 에 나타내었다. 광원은 최대 출력이 5W 인 코히런트 아르곤-이온(coherent argon-ion) 레이저를 사용하였으며, 실험은 약 1W 정도에서 수행되었다. 광학계는 이차원 속도 측정을 위해 4-빔, 2-색 방식, 그리고 산란광 검출은 On-axis, 후방산란(backward scattering)방식을 사용하였다. 신호처리는 주파수 영역 해석 방식을 이용하는 DSA (Doppler Signal Analysis)를 사용하였다. 신호처리기에서는 신호 필터링, 도플러 신호 감지, 신호의 디지털화 및 도플러 주파수를 결정하기 위해서 DFT (Discrete Fourier Transform)등이 수행된다.

Table 1 Non-dimensional parameters

Non-dim. Parameters	Model	Actual
$Re_g = \frac{LV}{\nu}$	1.965 x 10 ⁵	5.672 x 10 ⁵
$Re_p = \frac{D_p V}{\nu}$	50.668	72.013
$St = \frac{\rho_p D_p^2 V}{18\mu L}$	0.827	0.705

Table 2 Specifications of PDPA system

Types of Beam	Green Beam	Blue Beam
Wave Length(λ)	0.5145 μm	0.4880 μm
Fringe spacing (d _f)	4.2310 μm	4.0130 μm
Fringe count	55	55
Beam waist	0.2340 mm	0.2219 mm
Measuring probe dia.(d _p)	0.2344 mm	0.2223 mm
Measuring probe length (l _p)	3.8550 mm	3.6560 mm
Measuring probe volume	0.1100 mm ³	0.0940 mm ³
Focal length	500 mm	
F [#] number	8.224	
Beam separation length	60.80 mm	
Beam angle	3.28°	

신호처리기에서 나오는 데이터는 DMA(Direct Memory Access)를 통하여 컴퓨터로 전송되어 저장되고, 전체 신호 처리기는 DSA 프로그램에 의해서 제어된다. 속도 측정 센서는 측정 위치로 정확히 이동하기 위해서 254μm 의 공간 분해성을 가진 3 축 이송 장치를 사용하였다. 이송 장치는 RS-232C 통신방식으로 컴퓨터와 연결되어 DSA 에 의해서 조절된다.

산란 입자 공급은 입자분리기 입구에서 입자가 균일하게 분포되도록 하기 위해 풍동의 공기 유입구에 입자 발생기(aerometrics Inc. : APG)를 두어 자연적으로 흡입되도록 하였다. 산란 입자의 평균 크기는 약 2μm 정도로 유체의 유동을 충분히 추종한다고 볼 수 있다.^(2,3) 산란 입자는 증류수와 글리세린을 3:1 로 혼합하여 사용하였다.

PDPA 광학계 구성을 Fig. 3 에 나타내었다. 속도의 주흐름 방향인 X 방향에는 그린빔(green beam)을, Y 방향에는 블루빔(blue beam)을 사용하였다. 또한, 출구 덕트에서 속도를 측정할 경우에는 유동의 출구 방향과 좌표계를 일치시키기 위해서 그린 및 블루빔을 동시에 반시계 방향으로 60° 회전하여 광학계를 구성하였다.

공기 속도는 Z 축 중앙의 7 개 단면(X-Y 평면)에서 각각의 guide plate 위치에 따라 측정하였다. 또한 덕트 내부의 3 차원 유동 효과를 확인하기 위해 guide plate 이동 거리가 30mm 에서 Z 방향으로 32, 64, 128mm 에서 각각의 X-Y 평면에서도 속도를 측정하였다. 측정 데이터는 각각의 측정점에서 2,000 개를 획득하였으며, 샘플링 시간(sampling time)은 입자 공급 상태에 따라 약간의 차이가 있었으나 대부분 250μsec 이하이다. 한 측정점에서 평균속도와 난류 강도 계산 이전에 2,000 개의 측정 데이터 중에서 표준편차가 3 이상 되는 것은 잡음으로 간주하여 제거하였으며, 이때 제거되는 데이터 수는 전체 데이터의 1% 미만이었다.^(4,5,6)

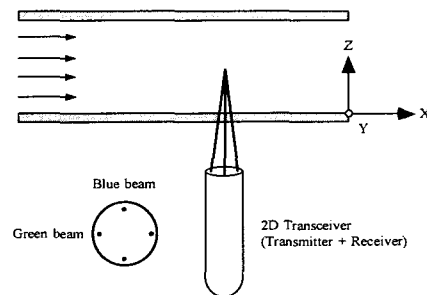


Fig. 3 Optical setup for 2-D velocity measurement

2.4 입자 실험

2.4.1 미분탄 크기

입자 실험을 위하여 화력발전소에서 사용하 있는 석탄을 분쇄하여 사용하였다. 석탄 분쇄에 사용된 장비는 cross-beater-mill 이며, 분쇄되는 미분탄의 크기는 체눈 크기에 의해서 결정된다. 본 실험에서는 0.12mm 체눈 크기를 갖는 체망을 사용했으며, 분쇄된 석탄의 기하 질량 평균 입경 (geometric mass mean size)은 약 50~60 μ m 이다. 이것은 실제 발전소에서 채집된 입경과 거의 일치한다. 미분탄의 평균 입경은 입경 측정 장비(API, Amherst Process Instruments Inc.)를 이용하여 측정하였다. 석탄 입자의 형상과 실제 입자 크기를 확인하기 위해 전자현미경(SEM)을 이용하여 1000 배율로 사진 촬영하여 Photo. 1 에 나타내었다. 석탄 입자 형상은 불규칙한 다면체이고, 실제 입자 크기는 대부분 100 μ m 이하임을 확인 할 수 있었다.

2.4.2 입자 발생 장치

입자 실험을 위해서는 먼저 미분탄을 풍동 입구에 균일하게 공급하여야 하는데, 이때 고려해야 할 사항은 공급입자의 균일성, 공급률(feeding rate) 변화, 막힘 현상 방지 등이다.

Fig. 4 에 입자 공급 장치의 계통도를 나타내었다. 입자 공급 방법은 다음과 같다. 먼저, 입자 저장 탱크에 저장되어 있는 미분탄은 호퍼 아래로 분산되면서 자유 낙하하게 된다. 이렇게 자유낙하한 입자들은 진공 펌프를 통하여 풍동 안으로 유입된다. 진공펌프는 압축기에서 나온 압축공기를 이용하여, 입구 부위는 진공을 형성하고 출구 부위는 압축공기를 형성한다. 따라서, 진공펌프 입구 부분에 진공이 형성되므로 호퍼 아래 부분에 연결하여 입자를 흡입하게 된다. 이때 흡입된 입자는 진공펌프 출구 부위에서 만들어진 압축공기와 함께 풍동 내부로 분사된다.

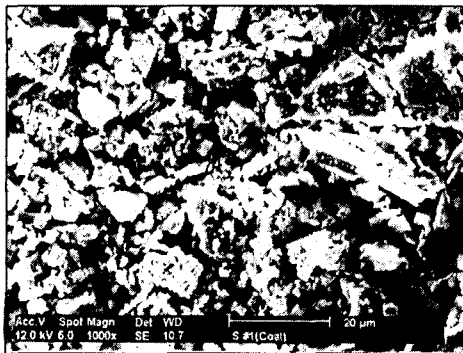


Photo. 1 Pulverized coal shape

입자 공급량은 모터에 의하여 구동되는 스크류 피더의 회전수에 의하여 결정된다. 특히, 진공펌프에 공급되는 공기압은 튜브 길이 및 단면적, 배출구의 개폐 정도와 실험 조건에 영향을 받으므로 공기압 선정에 주의해야 한다. 본 실험에서는 1.5kg/cm² 정도에서 실험이 수행되었다. 입자분리기 모델 입구에서 입자가 균일하게 공급되는지를 확인하기 위해 pre-filter 를 설치하여 가시적으로 확인하였으며, 실험기간 동안에 풍동 바닥에 쌓이는 미분탄의 양은 공급량에 비하여 매우 적었다.

2.4.3 실험 방법

입자분리기 출구 덕트(측정 단면 6, 7)에서의 미분탄 질량비 측정을 위해 유리 섬유 필터를 이용하였으며, 측정 원리는 다음과 같다. 청정 필터에 혼합 유체(공기+미분탄)가 통과할 경우, 입자가 필터에 포집되어 필터 질량은 입자의 양에 의해서 달라진다. 즉, 입자를 포집하기 전의 필터 질량과 입자 포집 후의 필터 질량을 측정하여 질량 차로서 입자의 질량을 측정한다.⁽⁷⁾

필터 실험 장치(Fig. 5)는 샘플링 프루브, 필터 지지대, 필터, 유량계, 압력 조절기, 그리고 진공펌프 등으로 구성되며 작동 원리는 다음과 같다. 일정한 유량을 샘플링 프루브를 통하여 필터 지지대에 유입 시키면, 필터 지지대 내부에 설치되어 있는 필터에서 입자를 포집한다. 이때 필터를 통과하는 유량이 일정하게 유지되도록 필터 지지대 후단부에 유량계(KOFLDC : RK 1600R)와 진공 펌프(hitachi : K2034)를 설치하였다. 이때 샘플링 유량은 Isokinetic 샘플링 조건을 만족시키기 위하여, 측정 단면의 속도와 샘플링 프루브 내부의 유속이 일치하도록 유량을 선정 한다^(8,9). 샘플링 프루브를 이송 장치로 측정 단면에서 높이방향으로 천천히 이동하면서 일정한 유량을 필터 지지대 내부에 유입시킨 후, 포집된 입자의 질량은 분석용 천칭(1cco-250 analytic balance)을 이용하여 측정하였다.

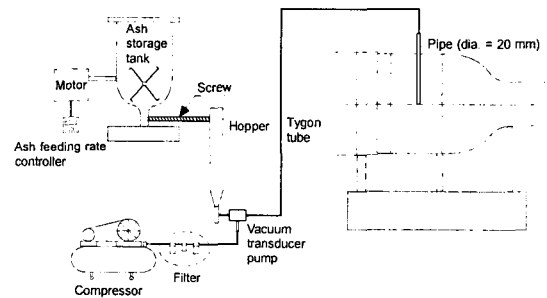


Fig. 4 Schematic diagram of particle feeding system

그리고 샘플링 프루브와 필터 사이의 입자 손실을 최소화하기 위해 샘플링 프루브는 전도성이 우수한 동(copper)으로 제작하였고, 샘플링 튜브는 타이곤(tygon) 튜브를 사용하였다. 실험용 입자는 입자 공급 시 막힘 현상을 방지하기 위해 고온 건조기에서 장시간 가열 건조 후 실험에 사용하였다. 필터는 실험실 내에서 24 시간 이상 방치하여 실험실 내의 온도 및 습도 조건이 같은 상태에서 무게를 측정하여 사용하였다. 실험 모델 내부의 정전기 현상에 의해 벽면에 미분탄이 붙는 현상을 방지하기 위해 알루미늄 테이프를 모델 내부에 접착한 후 접지 상태에서 실험을 수행하였다.⁽¹⁰⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 실험 결과

본 연구에서는 입자분리기 내의 유동 분포 및 상하위 출구 공기유량 비를 측정하기 위해 PDPA를 이용하여 속도를 측정하였다. 출구에서 공기유량은 측정단면적과 측정단면에 수직인 속도 성분의 평균값을 이용하였다. 또한, 출구에서 속도의 3차원 효과를 확인하기 위해 출구덕트 폭 방향 변화에 따라 속도 분포변화를 측정하였으나, 변화 폭은 무시할 정도로 작은 값을 가졌다. 따라서 출구 평균속도는 폭 방향 중심에서 측정된 값을 사용하였다.

Fig. 6 (a), (b)에 Y/Y_R 가 0, 1에 대한 속도 벡터를 나타내었다. 여기서, Y_R 는 guide plate 이동거리의 기준값이며, Y 는 기 설계된 guide plate 위치를 기준으로 guide plate 이동 거리이다. Y/Y_R 가 음의 값일 경우에는 출구 쪽으로 guide plate가 이동하는 것을 의미하고, 양의 값일 경우에는 반대쪽으로 이동하는 것을 나타낸다. Fig. 6 (a)는 guide plate

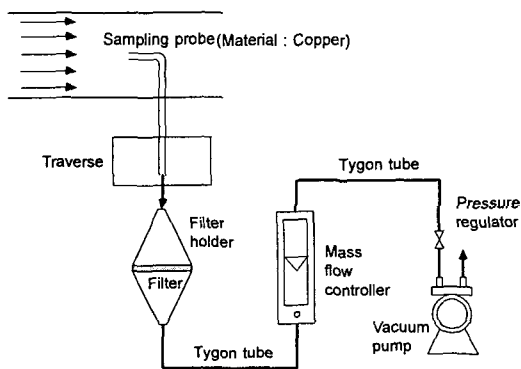


Fig. 5 Schematic diagram of filter system

위치가 기 설계된 입자분리기의 guide plate 위치와 동일한 경우이다. 이때 대부분의 유량이 상위 출구를 통하여 빠져나가 공기유량 설계조건을 전혀 만족하지 못함을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 입자분리기 내부의 속도벡터를 살펴보면 쉽게 예측이 가능하다. 즉 상하위 출구로 분기되기 전에 설치되어 있는 bump 2에 의해 유동방향이 상위출구 쪽으로 치우쳐 있기 때문이다. 위의 결과로부터 공기유량 설계조건을 만족하기 하기 위해서는 입자분리기의 형상 변경 필요하며, 본 연구에서는 기존 입자분리기의 설계변경변수로 guide plate 위치를 고려하였다. Fig.6 (b)는 guide plate 위치가 기 설계된 입자분리기의 guide plate 위치보다 아래쪽으로 이동된 경우인데, Fig. 6 (a)에 비하여 상하위 출구의 유량이 개선됨을 확인 수 있다. 이는 상위 출구의 입구 단면적이 감소함에 따라 내부저항이 증가하게 되어 하위출구로 더 많은 유동이 통과하기 때문이다.

Table 3에 guide plate의 위치 변화에 따른 하위 출구에서의 공기유량 비를 나타내었다. Table 3에서 하위출구 유량 비(lower air flow ratio, AFR)는 Y/Y_R 값이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이때, 하위출구 유량 비는 하위출구 유량에 대한 입구유량의 비로 정의된다. Table 3에서 실제오차는 하위출구 유량과 설계유량 차를 의미한다.

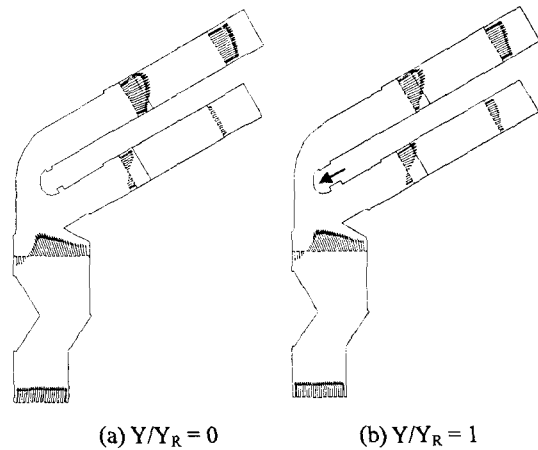


Fig. 6 Velocity vector at a variations of guide plate

Table 3 Air flow rate at lower duct

Guide plate (Y/Y_R)		-1	-0.5	0	0.5	1
Air Flow (m^3/s)	Upper Duct	3.03	2.94	2.77	2.53	2.26
	Lower Duct	0.02	0.18	0.47	0.73	0.95
Lower Air Flow Ratio (%)		0.6	5.8	14.5	22.3	29.6
Design Error (%)		-49.4	-44.2	-35.5	-27.7	-20.4

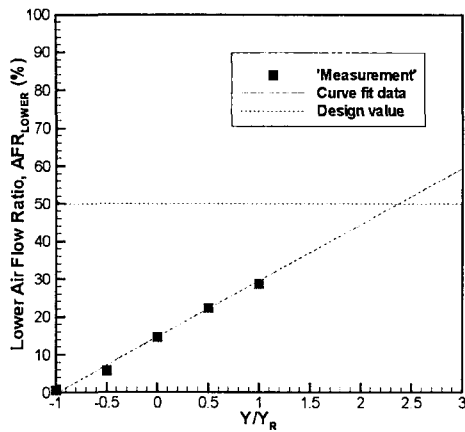


Fig. 7 Comparison of lower air flow ratio

본 연구에서 사용된 입자분리기 실험모델은 Y/Y_R 값이 ± 1 까지만 guide plate 가 이동 가능하도록 제작되어, 공기유량 측면에서 설계조건을 만족하는 guide plate 위치까지는 실험을 수행하지 못하였다. 그러나 guide plate 이동거리와 하위출구 유량이 거의 선형적으로 증가함으로 외삽법에 의해 설계조건을 만족하는 Y/Y_R 값을 Fig. 7에 알 수 있듯이 약 2.5 정도임을 유추 할 수 있다.

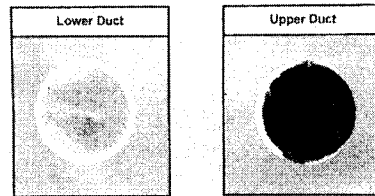
3.2 입자 실험 결과

입자분리기 출구를 통하여 빠져나가는 미분탄의 질량비를 측정하기 위하여 glass fiber filter 를 이용하여 입자실험을 수행하였다. 입자 실험 시 샘플링 유량은 isokinetic 샘플링이 가능하도록 출구 덕트의 평균 속도(측정 단면 6,7)를 이용하여 결정하였다. 각각의 출구에서 포집된 미분탄의 총 무게는 guide plate 의 위치에 상관없이 100mg/min 정도로 비교적 일정하게 포집 되었으며, 3 회 정도 반복하여 실험을 수행하였으나 실험 결과에는 큰 차이가 없었다.

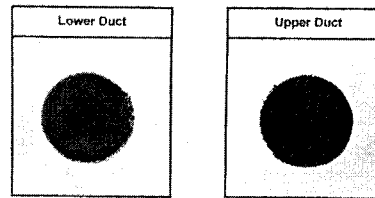
Table 4 에 guide plate 의 위치 변화에 따른 하위 출구 미분탄 질량비(lower particle flow ratio, PMR)를 나타내었다. 기존 설계 위치($Y/Y_R = 0$)에서는 대부분의 미분탄이 상위출구를 통하여 빠져나갔다. 이러한 결과는 입자분리기의 설계조건과 비교하여 CRS 위치가 바뀌었을 뿐만 아니라 미분탄 분배율도 설계조건에 크게 벗어났다. 미분탄 분배측면에서도 유동실험결과와 마찬가지로 입자분리기의 설계조건을 만족하지 못하였다. $Y/Y_R > 0$ 경우에는 하위덕트를 통과하는 미분탄이 급격히 증가하는 경향은 나타내었다. 그러나 $Y/Y_R < 0$ 경우에는 미세한 양의 미분탄이 통과하고 guide plate 이동거리에 따라 거의 변화가 없었다. 앞 절의 공기 유량비는

Table 4 Coal particle flow ratio in exit ducts

Guide Plate, Y/Y_R		-1	-0.5	0	0.1	1
Upper Duct	Sampling Flow (lpm)	20.7	20.1	19.0	17.3	15.5
	Collected coal weight (mg)	97.7	70.8	106.7	93.4	72.1
Lower Duct	Sampling Flow (lpm)	0.01	1.3	3.4	5.3	6.9
	Collected coal weight (mg)	0.1	0.3	1.4	1.7	29.1
Lower Particle Mass Flow Ratio (%)		0.1	0.3	2.0	10.1	28.8
Design Error (%)		-69.0	-69.7	-68.0	-59.9	-41.2



(a) $Y/Y_R = 0$



(b) $Y/Y_R = 1$

Photo. 2 Photograph of the coal particles deposition on glass fiber filter

Y/Y_R 에 따라 거의 선형적으로 증가하였으나, 미분탄 질량비는 지수 함수 형태로 변화하였다. 이와 같이 입자 거동은 guide plate 이동거리에 따라 민감하게 변화하였다.

Photo. 2 (a), (b)에 Y/Y_R 변화에 따라 상·하위 출구에서 포집된 미분탄을 나타내었다. 사진에서 좌측은 하위출구, 우측은 상위출구를 나타낸다. 사진 (a)에서는 앞에서 언급한 것처럼 대부분의 미분탄이 상위출구로 빠져나감을 가시적으로 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 발전소에 설치된 입자분리기 상위출구에서 발생하는 마모 현상과 일치하였다. Photo. 3 에 실제 입자분리기 상위출구에서 미분탄에 의해서 발생한 마모현상을 나타내었다. 사진에서 상방향에 큰 입자에 의한 부식이 집중되어 물결모양의 마모가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이에 반하여 하위 출구에서는 작은 입자에 의해 부식이 아주 미세하게 발생하였다. 위의 결과로부터 실제 발전소의 운전 결과와 실험 결과가 거의 일치됨을 볼 수 있다. 사진 2 (b)는 (a)에 비하여 하위출구를 통과하는 미분탄이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 설계 개선

모델 실험 결과 입자분리기의 설계조건을 만족하기 위해서 guide plate 이동거리가 $Y/Y_R \approx 2.5$ 정도임을 확인 할 수 있다. 과연 $Y/Y_R \approx 2.5$ 에서 입자분리기 설계조건 만족 여부를 확인하기 위해 열유체 범용 해석프로그램인 FLUENT 를 이용하여 유동 및 이상유동해석을 수행하였다.

먼저, 유동해석은 모델실험조건과 동일한 상태에서 수행하였으며, 난류모델은 RNG (Reynold Stress Model)모델을 사용하였다. Fig. 8 에 기 설계조건과 guide plate 이동거리가 $Y/Y_R = 2.5$ 인 경우에 대하여 속도 분포를 나타내었다. 기 설계조건에서는 하위출구로 14% 정도의 유량이 통과하였지만, $Y/Y_R = 2.5$ 에서는 하위출구로 50% 유량이 통과하여 입자분리기의 설계조건을 만족하였다.

공기-미분탄 유동해석을 위해 Rosin-Rammler 입자 분포를 이용하여 유동을 해석하였다. Rosin-Rammler 입경 분포는 식 (1)과 같이 입자의 직경 D 와 D 보다 큰 직경을 가지는 입자의 질량분율 (mass fraction)인 M_D 사이에는 지수관계를 갖는다는 가정을 하였다.⁽¹¹⁾

$$M_D = \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right] \quad (1)$$

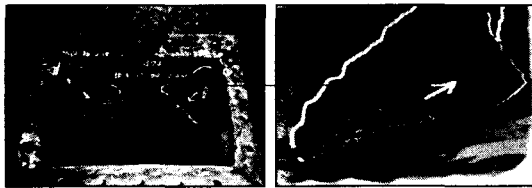


Photo. 3 Erosion of Coal splitter at upper duct



(a) $Y/Y_R = 0$ (b) $Y/Y_R = 2.5$

Fig. 8 Velocity contour of coal splitter

여기서 \bar{D} 는 평균입경이고, n 은 확장계수(spread

parameter)이다. 이 확장계수를 구하기 위해서는 입경 데이터를 Rosin-Rammler 지수함수에 적합하도록 맞추어야 한다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 Rosin-Rammler 지수함수 변수값 계산하기 위해서 화력발전소 보일러에 사용되고 있는 파시르탄의 입경 분포를 이용하였으며, 미분탄의 입경분포 및 확장계수 값은 Fig. 9 와 같다. Rosin-Rammler 입경분포 함수를 이용하여 입자의 유동을 계산할 수 있게 되었는데, Fluent 에 입력해야 할 변수와 그에 해당하는 값을 Table 5 에 나타내었다. 한편, 입자분리기의 입구에서 공기에 대한 입자의 부피비는 0.08%정도 이며, 위의 조건에서는 uncoupled 해석 방법(eulerian for air, lagrangian for particle)으로 유동을 해석하여도 문제가 없다.⁽¹²⁾

Table 5 의 변수 값들을 이용하여 FLUENT 에 있는 다상유동해석 방법을 사용할 경우에는 문제가 있다. 즉 입자분리기 입구 좌측에는 크기가 작은 입자가 위치하고 우측에는 큰 입자가 위치하게 되어 실제의 완전한 혼합조건과 상이한 결과를 유발할 수 있다. 따라서 보다 정확한 계산을 위하여 다음과 같은 수정된 방법을 이용하였다. Rosin-Rammler 해석에서 1st 입경과 2nd 입경을 번갈아두고 그 결과를 중첩하는 방법을 착상하였다. 더욱 더 정확한 방법은 중첩하는 위치를 조금씩 바꾸면 되지만, 위와 같은 방법과의 결과를 비교하여도 큰 차이가 없었다.

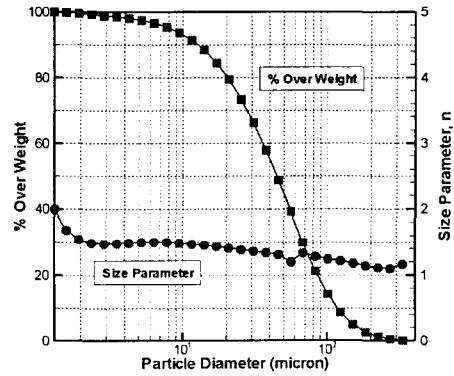


Fig. 9 Histogram with particle size distribution

Table 5 Input variables of Rosin-Rammler distribution

Variable	Value
1 st Diameter (m)	0.500×10^{-6}
2 nd Diameter (m)	4.042×10^{-4}
Mean Diameter (m)	5.923×10^{-5}
Spread Parameter	1.389

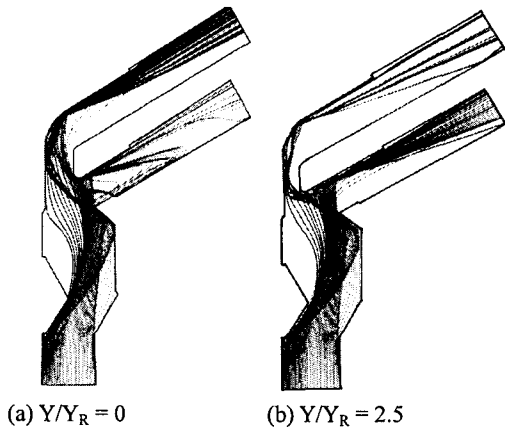


Fig. 10 Particle trajectory

Fig. 10 에 기 설계조건과 guide plate 이동거리가 $Y/Y_R = 2.5$ 인 경우에 대하여 입자분포 궤적을 나타내었다. 입자 크기가 작은 경우 입자유동은 공기 유동에 의해 좌우되어 입자의 궤적은 공기의 유선과 거의 일치하였지만, 입자의 크기가 증가할수록 입자의 궤적은 관성력에 영향을 받아 공기 흐름과 차이가 있었다. 입자분리기 설계조건 측면에서 기 설계조건에서는 하위출구로 2% 정도의 미분탄이 통과하였지만, $Y/Y_R = 2.5$ 에서는 하위출구로 69% 미분탄이 통과하여 입자분리기의 설계조건을 만족함을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 실험에서는 설계 조건을 만족하는 입자분리기 형상을 도출하기 위해 상하위 출구를 통과하는 공기와 입자 질량비를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 하위출구 유량비는 guide plate 이동 거리에 따라 선형적으로 증가하였으나, 입자 질량비는 지수 함수 형태로 증가하였다.
- 유리 섬유 필터를 사용한 입자 실험 결과는 실제 발전소의 운전 조건 중에 발생한 상위출구에서 발생하는 마모 현상과 일치하였다.
- 기 설계위치($Y/Y_R = 0$)에서는 유동 및 미분탄 모두 설계조건을 만족하지 못하였다. 유동-입자의 설계조건과 실험치의 오차를 살펴보면, 유동은 -35%, 입자는 -68% 정도이다.

- 입자분리기 실험 결과를 이용하여 설계 조건을 만족하는 Y/Y_D 위치를 외삽법으로 $Y/Y_D \approx 2.5$ 근처 임을 추정하였다. FLUENT 를 이용하여 공기-입자 유동 해석을 수행한 결과 $Y/Y_D = 2.5$ 에서 유동 및 입자 설계 조건을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Tu, Y. and Fletcher, C. A. J., 1993, "Modeling of Dilute Gas-Particle Turbulent Flows Over a Two-Dimensional Cylinder," *Int. J. of Multiphase Flow*.
- (2) Thompson, H. D. and Stevenson, W. H., 1979, "Laser Velocimetry and Particle sizing," *Proc. International Workshop on Laser Velocimetry, 3rd*, Purdue University.
- (3) Goldstein, R. J., 1983, "Fluid Mechanics Measurement," Hemisphere publishing Corporation, Washington.
- (4) Buchhave, P., George, W. K. and Lumely, J. L., "The Measurement of Turbulence with the Laser-Doppler Anemometer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.11, pp. 443-503.
- (5) Hoesel, W. and Rodi, W., 1977, "New Biasing Elimination Method for Laser Doppler Velocimeter Counter Processing," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 48, No. 7, pp. 910-919
- (6) Johnson, D. A., Modarress, D. and Owen, F. K., 1984, "An Experimental Verification of Laser-Velocimeter Sampling Bias and Its Correction," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, pp. 5-12.
- (7) Belyaev, P. and Levin, L. M., 1974, "Techniques for Collection of Representative Aerosol Samples," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 5, pp. 325-338.
- (8) Kirsh, A. and Stechkina, I. B., 1978, "The Theory of Aerosol Filtration with Fibrous Filters," *Fundamentals of Aerosol Science*, Shaw(Ed.), Wiley, New York.
- (9) Lippmann, 1978, "Filter Media and Filter Holders for Air Sampling," *Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminations, 5th*, ACGIH, Cincinnati.
- (10) William C. H., 1982, "Aerosol Technology," John Wiley & Sons.
- (11) Rosin, P. and Rammler, E., 1933, "The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal," *J. Inst. Fuel.*, Vol. 7, pp. 29-36.
- (12) Fluent Incorp., 1993, "PreBFC User's Guide. Ver. 4.2," U.S.A.