

## 세라믹 캔들 필터 주위의 분진 속도분포 측정

고용서\* · 정진도\*\* · 김승태\*\*\*

\* : 수원대학교 기계공학과

\*\* : 호서대학교 환경공학과

\*\*\* : 수원대학교 대학원 기계공학과

(1999년 4월 20일 접수, 1999년 7월 22일 채택)

### Measurements of Dust Velocity Field around the Ceramic Candle Filter

Yong-Seo Ko\*, Jin-Do Chung\*\*, Seung-Tea Kim\*\*\*

\* : Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Suwon

\*\* : Dept. of Environmental Engineering, Univ. of Hoseo

\*\*\* : Dept. of ME, Graduate School, Univ. of Suwon

Key Words : Ceramic Candle Filter(세라믹 캔들 필터), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer), Dust Cake Layer(분진층), Dust Inlet Position(분진 투입 위치)

#### 요 약

본 연구는 독일 Schumacher사의 1m 크기의 세라믹 캔들 필터가 1개 설치된 실험장치를 구성하여 집진시 단일 필터 주위에서의 분진 속도분포를 PDPA를 이용하여 측정하고, 분진층의 유무와 분진 투입 위치에 따른 분진 속도분포의 변화를 관찰하였다.

측정 결과 집진이 계속되어 필터 표면에 분진층이 발달함에 따라 집진 속도가 감소됨을 알 수 있었다. 특히, 투입구가 위치하는 필터표면에서 집중적으로 분진층이 발달하여 이곳에서의 분진 속도 감소가 크게 나타났다. 그리고 필터 내부와 압력용기부사이의 압력 차에 의한 필터 표면에서의 분진 속도 평균값은 0.28m/sec 이었다. 또한 분진 투입을 압력용기부 하단에 위치한 투입구로 투입하였을 때 필터 주위의 분진의 고른 속도분포를 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT : The experimental set-up with a 1m long ceramic candle filter of Schumacher(Germany) was built in this work. The dust velocity field around the filter was measured using PDPA. The effects of dust cake layer and dust inlet position on the dust velocity field were also analyzed.

It was found that the filtration velocity decreases as the dust cake builds up on the filter. The filtration velocity largely decreases around the filters near the dust inlet since the dust cake develops fast there. The average dust velocity on the filter due to the pressure difference through the filter was measured to be 0.28m/s. More uniform dust velocity field around the filter was obtained when feeding dust in a lower position of the pressure vessel.

## 1. 서론

최근 들어 차세대 청정 석탄화력발전의 형태로 각광받고 있는 석탄가스화 복합발전 시스템(IGCC)과 가압유동층연소 복합발전 시스템(PFBC)은 낮은 연료 가격과 발전단가로 고효율의 성능과 우수한 환경성능을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 미국, 일본, 유럽 등과 같은 기술 선진국을 위시하여 전 세계적으로 IGCC와 PFBC의 연구·개발에 많은 노력이 기울여지고 있다.<sup>(1)</sup>

고온고압 집진 설비는 터빈의 마모를 줄이고 분진과 같은 대기오염물질의 배출을 제어하기 위해서 필수적이다. 뿐만 아니라 차세대에 더욱 높은 열효율 향상, 가스터빈의 수명 연장, 그리고 환경오염 감소를 위하여 집진 조건이 더욱 가혹해지고 엄격해질 전망이며, 이를 위해서는 고온고압 집진 기술 개발이 절실히 요구되고 있다.

고온고압에서 응용이 가능한 집진의 개념은 여러 가지가 소개되었으나 실제로 고온고압 집진에 사용될 잠재력이 큰 것은 다단 사이클론, 입자층 여과기(granular bed filter), 전기 집진기, 그리고 세라믹 필터 등이다.

이중 층으로 구성되어 있는 세라믹 캔들 필터의 집진은 주로 멤브레인 층에서 이루어지며 이 층의 기공 크기 조절에 의하여 집진 효율이 조절된다.<sup>(2)-(6)</sup> 현재 상용으로 제조되고 있는 세라믹 캔들의 기공은 10 $\mu$ m 정도이며 집진 효율이 99.9+%, 5 $\mu$ m 이상의 입자가 100% 포집되며, 입자 배출농도가 5ppm 이하이다. 캔들 필터의 압력손실은 다른 집진기에 비하여 높은 편이고 가스 처리량도 낮은 편이지만 절대적인 집진 효율을 추구할 수 있는 이점이 있어 세라믹 캔들 필터가 IGCC와 PFBC를 비롯한 고온고압 집진에 가장 무난한 것으로 판단된다.<sup>(7)-(10)</sup> 세라믹 캔들 필터 시스템이 고온가스 정제에 최적장치로 고려되고 있지만, 이 복합장치는 아직 필터 파손 등과 같은 문제를 안고 있다.<sup>(11)(12)</sup>

세라믹 캔들 필터의 핵심 기술은 필터의 설치다. 세라믹 필터를 금속 집진기에 고정시킬 때 역세에 의해서 발생하는 열 및 기계적 스트레스를 흡수할 수 있게 밀봉시켜야 한다. 비교적 낮은 온도에서는 스프링이나

필터 자체의 무게를 이용하여 수월하게 설치할 수 있지만 고온에서는 세라믹 가스켓의 소실과 금속의 뒤틀림 등으로 장기 내구성에 관한 기술의 확보가 요구된다. 또한 상용설비에서 수천 개의 캔들 필터를 효율적으로 배열하는 것은 경제성과 직결된다. 이 경우에는 필터의 세척을 그룹별로 하게 되는데 역세시 필터 표면에서 분출되는 역세 가스에 의한 필터의 진동이 우려된다. 이것을 방지하기 위해서는 집진기 내부의 가스흐름을 균일하게 분포시켜 가스흐름에서 발생하는 진동이나 불균등 스트레스를 해소하는 것이 대형 집진기의 설계에서 중요한 기술이다.<sup>(2)-(6)</sup> 이를 위해서 투입구의 위치 및 분산, 집진기 내부의 방해판 설치, 그리고 필터의 적절한 배치 등에 관한 모사연구가 진행되고 있으나 아직까지 개발단계에 있다.<sup>(13)(14)</sup>

필터 주위의 분진 속도분포는 필터의 집진 특성을 정성적으로 보여주는 것은 물론 집진기 내부의 가스흐름이 얼마나 균일한지를 간접적으로 보여준다. 따라서 본 연구는 3-D PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)로 단일 필터 주위의 분진 속도분포를 측정하여 필터 표면에서의 분진층의 발달에 따른 집진 속도 변화, 집진시 필터 주위의 분진 속도분포 특성, 그리고 집진시 투입위치에 따른 필터 주위의 분진 속도분포 변화를 분석하고자 한다. 이러한 측정 및 분석 결과는 필터 배열 간격 및 분진의 투입방법 결정 등 세라믹 캔들 필터 설계의 기초자료로 사용될 수 있고, 세라믹 캔들 필터 simulation의 중요한 data를 제공하여 simulation 결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

집진 및 역세시 필터 주위의 분진 속도 측정에 사용된 측정장치는 Aerometrics사의 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)이다. 이 PDPA 시스템은 위상/도플러 기법을 이용한 측정 장치로 크게 laser, fiber driver, receiver, transmitter, 신호처리를 위한 RSA(real-time signal analyzer) 및 컴퓨터로 구성되어 있다.<sup>(15)-(18)</sup>

집진시 필터 주위 분진 속도분포 측정을 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 높이 1.8m, 내경 0.33m의 압력용기 속에 외경 6cm, 내경 4cm, 길이 1m 크기의 세라믹 캔들 필터가 1개 설치되어 있으며, 유로계, 필터를 감싸고 있는 압력용기부, 압력용기부 아래 30° 각도로 설치된 ash hopper, data acquisition system으로 구성되어 있다.

유로계는 세라믹 캔들 필터 엘리먼트 내부와 외부 표면에 적층된 분진을 제거하기 위한 공기를 공급하는 pulsed air 공급 계통과 분진을 포함한 가스를 이송하는 계통으로 나눌 수 있다.

Pulsed air 공급 계통의 작동은 다음과 같다. 공기 압축기(air compressor)를 나온 공기가 습기제거 필터를 통과하면서 함유된 습기가 제거되며, pressure regulator는 이 공기의 압력을 실험에 적합한 정압으로 조정한다. 정압의 공기는 on/off 밸브를 통하여 receiving tank에

저장되며, 이곳에서 공기압축기에서 발생한 압축공기의 변동성분이 제거된다. 또한 pulsed air의 변동성분을 완벽하게 제거하기 위해 솔레노이드 밸브 전에 작은 탱크를 설치하여 밸브가 열리는 동안 일정한 압력으로 pulsed air가 분출되도록 하였다. 이 탱크에서 나온 공기는 공기중의 수분과 변동성분이 제거된 상태에서 솔레노이드 밸브로 이송된다.

분진을 함유한 가스를 이송하는 계통은 진공펌프를 이용하여 가스를 흡인하는 방법을 사용하며 분진은 특별하게 제작된 dust feeder에 저장된다. Dust feeder 하단에는 컴퓨터에 의해 회전수가 제어되는 stepping motor가 설치되어 있다. 이 stepping motor는 분진 이송용 screw와 연결되어 있으며, stepping motor에 의해 screw의 회전수를 조절하여 원하는 분진량을 공급한다. 이 분진은 진공펌프의 흡인력에 의해 유입된 공기와 혼합되어 압력용기부로 이송된다.

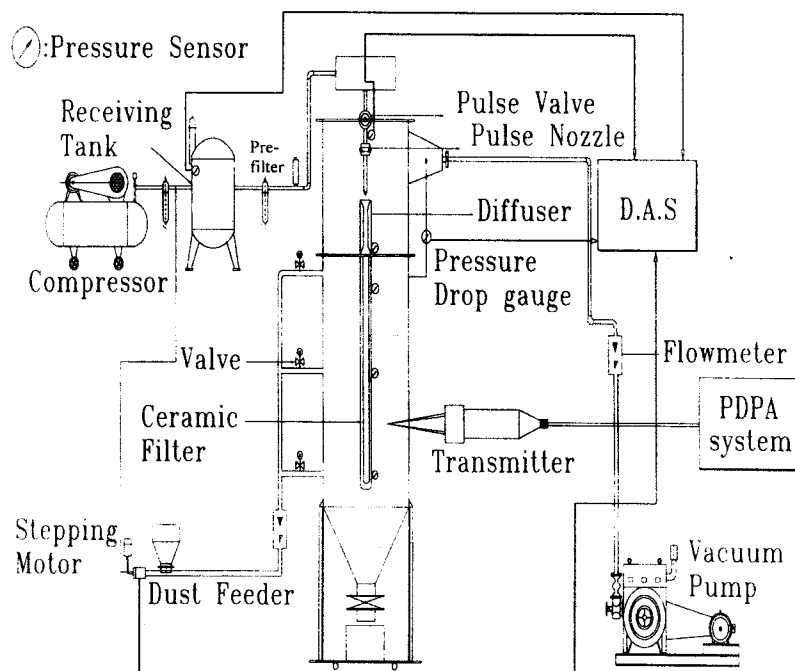


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up.

압력용기부는 집진 및 세라믹 캔들 필터 역세기 내부가 충분히 관찰되도록 하기 위하여 acryl tube를 사용하여 제작하였다. 압력용기부 전면에는 투명한 측정창을 제작하였다. 측정 창은 laser beam이 통과하는 부분이므로 측정 창에 ash가 부착되면 부착된 ash를 제거하기 위해 분해가 가능하도록 설계되었으며 집진사와 역세기 최대한 기밀이 유지되도록 하였다.

분진을 함유한 기체의 투입구는 압력용기 상단으로부터 각각 7.5cm, 47.7cm, 83.5cm에 위치하며, 투입구 내경은 3cm이다. 압력용기부에 유입된 혼합가스는 세라믹 캔들 필터에서 분진이 제거되고 분진이 제거된 clean gas는 진공펌프를 통하여 밖으로 배출된다.

Fig.1에서와 같이 유량관에 유량계를 설치하여 유량을 측정하고, 필터 내부 압력을 측정하기 위하여 필터 상부로부터 26cm, 46cm, 그리고 96cm 위치의 필터 내부에 pressure transducer를 설치하였다. 또한, 역세기 슬레노이드 밸브에서의 pulsing 압력을 측정하기 위한 pressure transducer도 설치하였다. 필터를 전후한 차압 (pressure drop)을 측정하기 위하여 압력용기부와 clean gas outlet에 차압계를 설치하였으며, 이 차압이 어느 이상의 값이 되면 세라믹 캔들 필터를 역세정하여 필터의 파손 및 과부하를 방지한다.

본 실험장치에서 data acquisition system은 설치된 유량계, 압력계와 차압계로부터 압력용기부로 유입되는 유량, receiving tank에서의 시간에 따른 압력변동, 세라믹 필터 내부의 압력 그리고 세라믹 캔들 필터를 통한 압력손실 등에 대한 물리량을 받아 컴퓨터의 기억장치에 기억하며 동시에 인디케이터(indicator)에 그 값이 나타나도록 설계되어 있다. 또한, 공기압축기 및 dust feeder에 설치된 stepping motor 운전과 슬레노이드 밸브 개폐를 제어한다.

## 2.2 실험방법

본 실험을 위한 실험장치의 운전조건을 Table 1에 나타내었다. Dust feeder를 자체적으로 제작하였으며, dust feeder 하단에 부착된 stepping motor의 회전수를 조절하여 분진 투입량을 조절한다. 본 실험에 사용한 분당 분진 투입량은 0.35g이고, 이를 13m<sup>3</sup>/min의 공기와 섞어 공급한다. 사용된 분진은 삼천포 화력발전소의 진

기집진기에서 포집된 ash를 사용하였는데 전기집진기에서 포집된 ash의 입경분포를 API사의 Aerosizer를 이용하여 측정한 결과 0.5~120 $\mu$ m로 부피기준 평균입경은 30 $\mu$ m이었다. 그렇기 때문에 삼천포 화력발전소 전기집진기에서 포집된 ash를 30 $\mu$ m의 체로 처리하여 사용하였다. 체로 처리된 ash의 부피기준 평균입경은 20 $\mu$ m이다.

Table 1. Experimental conditions.

Parameter	value or type
Operating Temperature	Ambient
Dust Loading	0.35g/min
Air Flow Rate	13m <sup>3</sup> /min
Dust Mean Size	20 $\mu$ m
Pulsing Pressure	5kgf/cm <sup>2</sup>
Dust Particle	Coal Ash

본 실험은 실제와 유사한 상황에서 세라믹 캔들 필터 주위의 분진 속도분포를 측정하여 필터의 ash 포집 능력을 가시화 하는 것이 주목적이다. 본 실험에서와 같이 세라믹 캔들 필터의 기공이 10 $\mu$ m인 경우에 집진시의 분진 거동을 살펴보면 필터에 부착하여 집진 되는 분진 입자의 크기는 주로 5-10 $\mu$ m 범위에 있다.<sup>(19)(20)</sup> 이 보다 크기가 작은 입자들은 많은 수가 필터의 기공을 통과하여 집진 되지 않으며, 반대로 이 보다 크기가 큰 입자들은 Van der Waalss 힘에 의한 응집으로 그 수가 현격히 줄어들고 크기가 커진 뒤 자중에 의해 필터 하부로 가라앉는다. 또한, 집진시 크기가 작은 입자들이 필터의 기공에 증착하여 기공의 크기를 5 $\mu$ m 정도로 줄이는 결과를 초래한다. 따라서 30 $\mu$ m 이상의 큰 입자를 배제하여 분진 속도와 공기 속도의 차이가 너무 커지는 것을 방지하면서, 위와 같은 실제 집진시의 분진 거동이 전부 나타나는 상황에 대하여 필터의 집진 능력을 가시화 하기 위하여 위와 같이 분진을 준비하였다. 이때 분진 입자의 크기 분포는 5 $\mu$ m 이하 25%, 5-10 $\mu$ m 범위 35%, 10 $\mu$ m 이상 40%로 측정되었다.<sup>(19)(20)</sup> 본 실험에서 분진은 유체유동을 측정하기 위하여 유체 속에 투입한 입자가 아니고 그 자체가 측정의 대상이다. 세라믹 캔들 필터 개발에 있어서 필터의 ash 포집 능력을 가시화해 보는데는 본 실험과 같은 측정 data를 필요로 한다.

역세 압력은 이전의 실험 결과 3~8bar 정도면 세

라믹 캔들 필터 내부에 고른 압력분포를 가지며 필터 표면의 ash를 세정할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 역세 압력을 5bar로 하였고 역세 가스로는 air compressor에서 압축된 air를 사용하였다.<sup>(1)</sup> 본 실험장치에서 역세방법은 설정된 임의의 시간에 따라서 일정시간 경과 후 역세 하는 방법, 설정된 압력용기와 clean gas 배출구와의 압력 차에 따라 설정된 값 이상으로 압력 차가 증가하면 역세 하는 방법, 그리고 임의로 button을 눌러서 역세 하는 방법이 있다. 본 실험에서는 세라믹 캔들 필터 표면에 형성된 dust cake층의 두께에 따라 집진 속도가 변화하기 때문에 필터 표면의 ash를 부드러운 솔을 이용하여 제거하고 button을 눌러 역세 하여 필터표면을 깨끗이 한 후 각각의 측정을 하였다.

분진 투입구의 위치가 미치는 영향을 파악하는 측정 이외에는 분진은 압력용기부 중앙에 위치한 투입구를 이용하여 투입하였다. 측정 좌표는 Fig. 2와 같이 압력용기 중심부에 위치한 투입구단면에서 필터중심을 기준 좌표로 설정하였다.

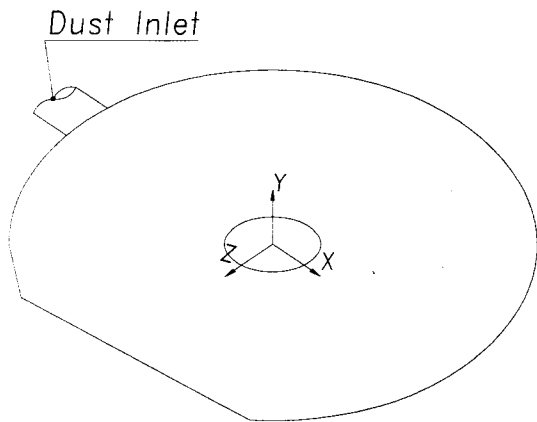


Fig. 2 Coordinate system for the measurements.

집진시 세라믹 캔들 필터 표면에 dust cake층이 형성된 상태에서의 측정에서는 먼저 세라믹 캔들 필터 표면에 형성된 dust cake층을 부드러운 솔을 이용하여 제거한 후 역세압력 5bar로 3회 역세정 하였다. 이렇게 필터 표면의 분진을 제거한 후 실험장치를 30분 동안 운전하여 세라믹 캔들 필터 표면에 dust cake층이 형성된 후 필터 주위의 분진 속도를 측정하였다.

집진시 세라믹 캔들 필터 표면에 형성된 분진층의

영향을 알아보는 실험에서 측정위치는 Fig. 2의 측정좌표에서 Z축 좌표가 0인 단면에서 측정하였다. 측정 영역은 X축 방향으로 -7cm, -5cm, -3cm(투입구 쪽 세라믹 캔들 필터 표면), 3cm(투입구 반대쪽 필터표면), 5cm 그리고 7cm 위치에서 Y축 방향으로 5cm 간격으로 -30cm~40cm까지 측정하였다. 분진층이 있는 경우와 없는 경우에 대해 측정을 하여 비교하였고, 이 중에서 분진 투입구 쪽 필터 표면(X=-3cm) 및 그 반대쪽 필터 표면(X=3cm)에서 측정한 분진속도는 분진층이 필터의 집진 속도에 미치는 영향을 파악하는데 사용되었다.

집진시 세라믹 캔들 필터 주위의 분진 속도 측정 실험에서 측정영역은 Z축 방향으로 0cm에서 12cm까지는 X축 방향으로 -7cm, -5cm, -3cm, 3cm, 5cm, 그리고 7cm 위치에서 각각 Y축 방향으로 -30cm에서 40cm까지 5cm 간격이다. Z축 방향으로 -2cm에서 -12cm까지는 X축 방향으로 -7cm, -5cm, 5cm, 그리고 7cm 위치에서 각각 Y축 방향으로 -30cm에서 40cm까지 5cm 간격이다. 매회 측정 시 앞의 설명과 같이 세라믹 캔들 필터 표면에 형성된 dust cake층을 부드러운 솔을 이용하여 제거한 후 역세압력 5bar로 3회 역세정 하였다.

분진 투입위치에 따른 영향을 파악하는 측정에서는 압력용기 상단으로부터 7.5cm 위치에 있는 투입구(Y=40.2cm)로부터 dust를 투입하고 Z축 좌표 0인 단면에서 X축 방향으로 -7cm, -5cm, -3cm, 3cm, 5cm, 그리고 7cm 위치에서 각각 Y축 방향으로 -30cm에서 40cm까지 5cm 간격으로 측정하였다. 그리고 투입위치를 중앙(Y=0cm)과 하부(Y=-35.8cm) 위치의 투입구로 변화시켜 같은 방법으로 측정하였다.

3차원의 속도를 측정하기 위해서는 2개의 transmitter와 receiver를 사용하여야 한다. 그러나 압력용기부의 형상이 3차원의 속도를 측정하기 어렵기 때문에 2차원(Fig. 3에서 X축, Y축 방향의 속도성분)의 속도만을 back scattering으로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Dust cake 층의 영향

집진시 필터 표면의 dust cake층이 집진 속도에 미치는 영향을 파악하기 위한 측정 결과는 Fig.3과 Fig.4

에 있다. 압력용기 분진 투입구 쪽의 필터 표면에서는 Fig. 3에서와 같이 필터표면에 dust cake층이 존재하는 경우(두께 0.4-0.7mm)가 그렇지 않은 경우보다 Y방향 속도가 작아짐을 알 수 있다. 특히 투입구가 위치한 중심부에서 그 차이가 큰 것을 알 수 있는데 최대 4.1m/s에서 1.7m/s로 감소하였다. 또한 X방향 속도도 중심부에서 속도의 차이가 가장 크게 나타났는데 0.752m/s에서 0.186m/s로 작아졌다. 이것은 진공펌프의 흡인에 의해 분진을 포함한 공기가 압력용기에 투입되어 필터를 통과하기 때문에 필터표면에 dust cake층이 형성되면 필터표면에서의 속도는 감소하게 됨을 나타낸다. 특히 중심부에서 속도 차가 가장 크게 나타난 것은 이 영역에서는 유입되는 유동의 직접적인 영향을 받아 dust cake층이 집중적으로 발달했기 때문으로 생각된다.

압력용기 분진 투입구 반대편의 필터 표면에서는 Fig. 4에서 보는바와 같이 Y=0cm에서 40cm까지는 dust cake층이 존재하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 Y방향

속도의 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 그러나 필터 하단부에서는 dust cake층이 필터표면에 존재하는 경우 속도가 dust cake층이 없는 경우보다 크게 나타났다가 다시 작게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 압력용기의 형상이 줄어드는 즉 압력용기 하단에 위치한 hopper의 형상에 의한 영향이 유동 형성에 작용하였기 때문으로 여겨진다. 투입구 반대쪽에서도 dust cake층이 존재하는 경우 X축 방향 속도는 필터의 모든 부분에서 작아짐을 볼 수 있다.

집진 속도는 Y방향속도(v) 보다는 X방향속도(u)가 작아함으로 이 실험으로부터 dust cake층이 발달함에 따라 필터의 집진 속도가 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 추후 dust cake층이 발달함에 따라 작아지는 집진 속도를 연속적으로 측정하여 발달된 dust cake층과 이에 따른 집진 속도의 변화, 그리고 이때의 압력변화와의 관계를 파악할 필요가 있을 것으로 사료된다.

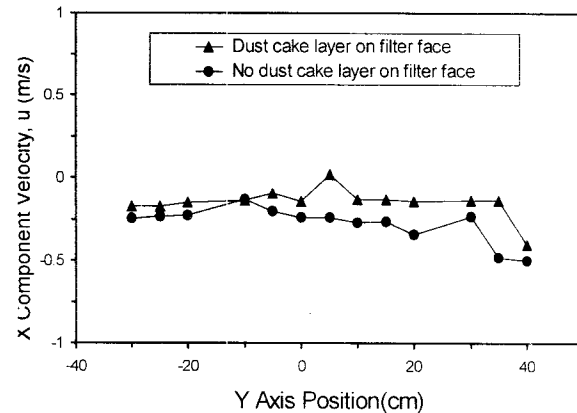
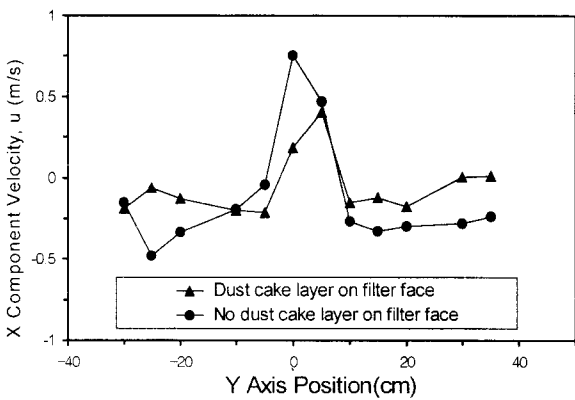
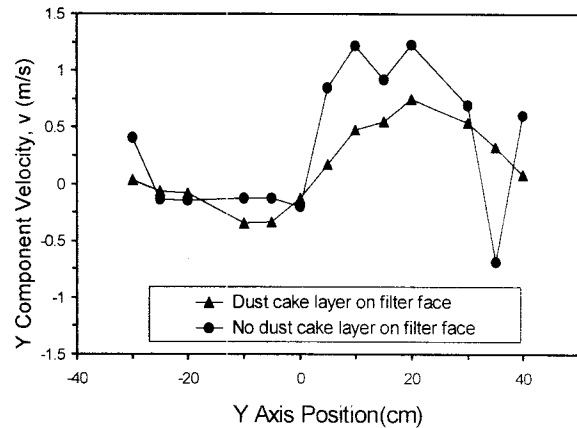
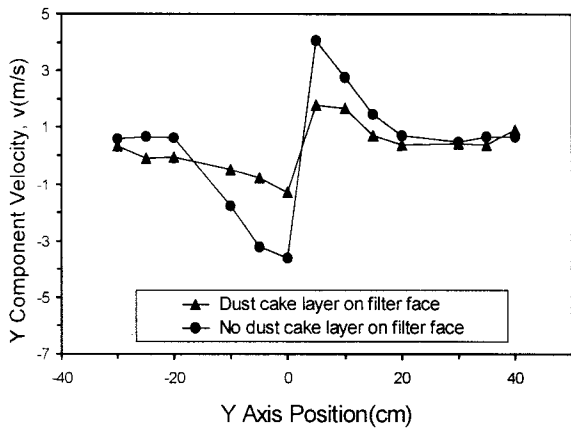


Fig. 3. Velocity distribution along Y direction on filter face (X=-3cm, Z=0cm) in the side of dust inlet.

Fig. 4. Velocity distribution along Y direction on filter face (X=3cm, Z=0cm) in the opposite side of dust inlet

### 3.2 집진시 필터 주위의 분진 속도분포

집진시 필터에 dust cake층이 없는 상태에서 필터 주위 분진 속도분포를 알아보기 위하여 분진이 중앙의 투입구로 유입될 때 X, Y방향 속도성분을 측정하였다. 압력용기부의 형상과 측정방법의 문제로 필터 주위 모든 부분을 측정할 수 없기 때문에 측정 가능한 부분을 X, Z 축 방향으로 2cm, Y축 방향으로 5cm 간격으로 측정하였다.

Fig. 5는 속도분포를 vector로 나타낸 것이다. Z=0인 위치에서 입구 부에서 유입되는 유동은 기하학적인 형상이 갑자기 확대되므로 이 영역에서 커다란 와류를 형성함을 볼 수 있다. 그리고 압력용기부 하부에서는 흐름이 상부에 비해 불규칙하게 형성됨을 볼 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 것과 같이 hopper의 형상에 의한 영향 때문인 것으로 여겨진다. 투입구가 위치한쪽의 필터 표면(X=-3cm)에서 속도분포를 보면 진공펌프 흡입에 의한 필터 내부와 압력용기와의 압력 차에 의해 형성되는 집진 속도를 관찰할 수 없다. 압력용기 입구 부에서 유입된 흐름이 필터표면에 도달하여 표면을 따라 상부와 하부로 나뉘어 흐르는 마치 jet flow와 같은 흐름을 볼 수 있는데, 이 영역에서 흐름의 속도가 매우 크다. 이는 유동에 의한 운동에너지가 매우 크다는 것을 의미한다.

이 결과에서 보듯 세라믹 캔들 필터는 압력용기 분진 투입구 쪽의 필터표면이 가장 큰 힘을 받고 또한 분진 부하가 집중됨을 알 수 있다. 이것은 유입된 유동의 영향을 받는 거리에 위치하기 때문으로 여겨진다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 보듯 Z=2cm와 Z=-2cm 위치에서도 관찰된다.

그러나 투입구 반대부분의 필터표면(X=3cm)에서는 투입되는 유동과 되돌아오는 유동의 영향을 적게 받기 때문에 진공펌프에 의해 형성된 필터 내부와 압력용기부와의 압력 차에 의한 속도 분포를 관찰할 수 있는데 이때 필터표면에서의 X방향 평균 속도는 0.28m/s이다. 그러나 X=5cm와 7cm 위치에서의 분진의 흐름은 전단에서와 마찬가지로 유입되는 유동의 영향에 의해 형성된 흐름을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Y=-5, 0, 5, 10cm인 단면에서 필터 주위의 흐름 중 X방향 속도성분을 보여주고 있다. Y=0cm인 단면에서 보면 투입구의 직경이 3cm 임으로 투입되는 유동의 주 흐름은 필터의 전단에서는 X축을 중심으로  $\pm 2$ cm(폭4cm)의 흐름을 유지하면서 필터 주위를 흐르고 있음을 볼 수 있다. 필터를 지나면서 흐름이 확대되지만 투입된 유동이 압력용기부의 벽과 만나면서 다시 되돌아가는 흐름을 볼 수 있다. 또한 유입되는 흐름과

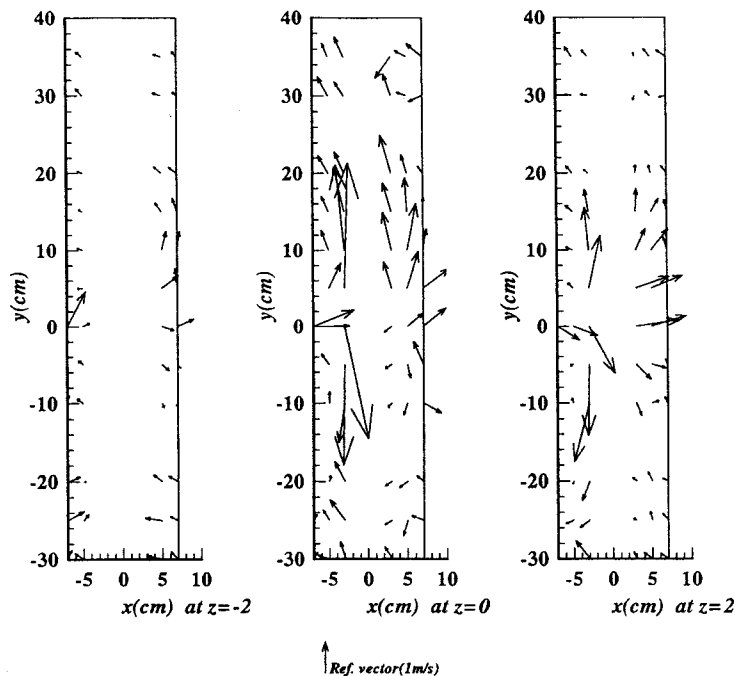


Fig. 5 Velocity vector around ceramic candle filter at Z=-2, 0, 2cm.

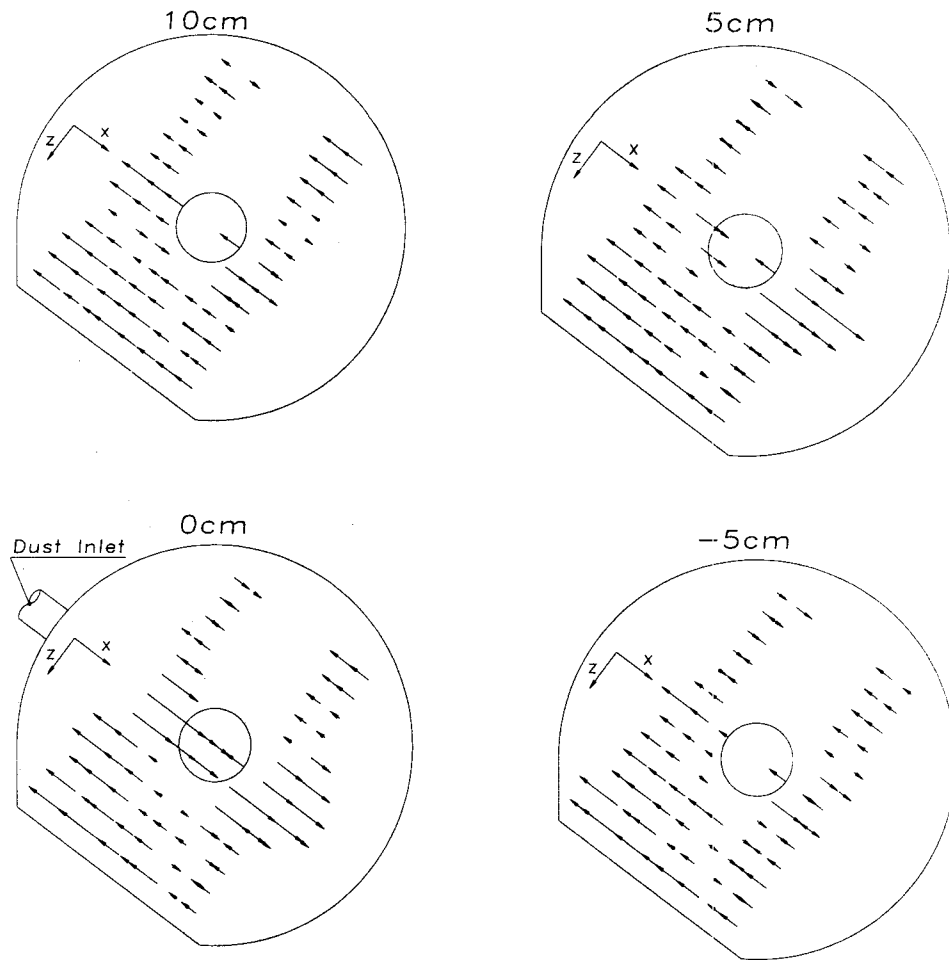


Fig. 6 X component velocity vector around ceramic candle filter at Y=-5, 0, 5, 10cm.

되돌아가는 흐름이 혼합되는 부분도 관찰된다. 이러한 유입 흐름의 영향은 Fig. 6에서 보듯 Y=10cm에서 -5cm 까지 에서도 볼 수 있다.

Fig. 6의 Y=0cm 단면에서 보면 분진 투입구와 필터 사이의 정체점(X=-3cm)이 있는 영역에서의 속도가 가장 크게 나타났다. 이는 이 영역에서 압력이 다른 부분에 비하여 크게 작용하고 있음을 의미하며, 이 부분에서 필터가 파손될 가능성이 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 분진 투입구 쪽 필터 전면에서 Y=0cm에서 5cm 이외의 영역에서는 흐름이 분진 투입방향과 반대로 형성되고 속도도 작기 때문에 필터가 파손될 가능성이 상대적으로 적다.

Fig.7은 분진 투입구 반대쪽 필터 표면으로부터

창쪽으로 12cm까지의 X방향 속도 값을 나타내었는데 투입유동의 영향은 Y축 방향으로 10cm에서 -5cm 까지, Z 축 방향으로로는 0cm에서 6cm까지 나타남을 볼 수 있다. Y축 방향으로 투입구 하단에서 투입유동의 영향이 빨리 감소되는 것은 앞에서 언급한 것과 같이 압력용기부의 hopper부분에서 형성된 와류와 투입유동이 만나기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 7에서도 Z=0인 위치 즉 필터 표면에서는 거의 일정한 속도를 관찰할 수 있다.



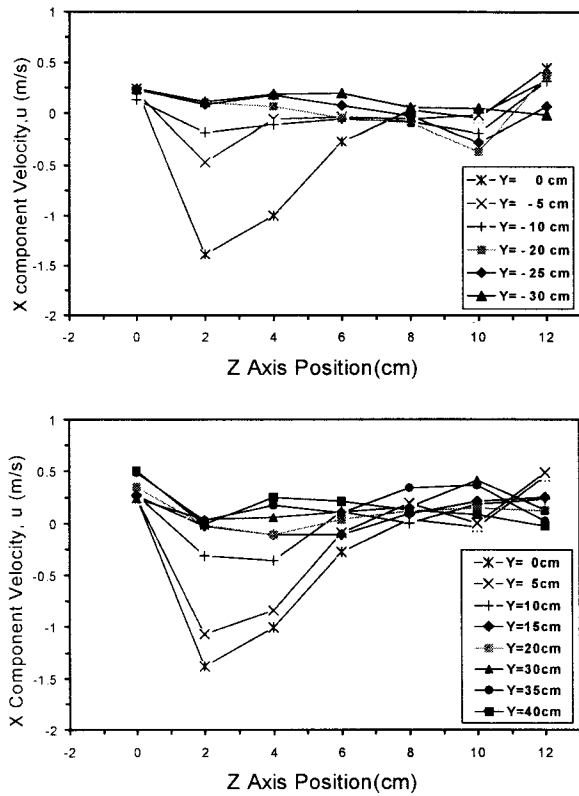


Fig. 7. X component velocity distribution along Z axis direction at Y=-30 cm~40cm

본 실험의 경우 유동의 특성을 알아보기 위하여 PDPA에 의한 속도 측정시 각 측정 점의 데이터를 분석

해보면 다음과 같다. 한 측정 점의 속도를 얻기 위한 측정 실험이 PDPA 시스템은 연속적으로 5000번의 시도를 하여 그 중 수백 개의 유효 데이터를 얻는데 이 데이터들은 난류 유동의 강도에 따라 어느 정도 교란되어 있다. 이 교란된 유효 데이터의 평균값이 측정속도이며 이 데이터들의 표준편차는 난류강도와 유사한 개념이다. 본 연구의 측정에 사용한 PDPA 시스템의 software는 표준편차를 제공하며, 이때 한 점 측정의 소요시간은 평균 0.9초이다. Table 4는 대표적인 몇 개의 측정 점에 있어서 각 점에서 얻어진 측정속도와 그 측정속도를 산출하는데 사용된 유효 데이터의 표준편차를 보여주고 있는데 표준편차는 대략 1~3 m/s 정도로 난류가 강하게 나타났다. PDPA나 LDV로 한 측정 점에서의 속도를 측정할 경우 측정속도는 이와 같이 주어진 짧은 시간 내에 연속적으로 얻어진 많은 유효 데이터를 평균한 값을 사용하며 난류유동의 경우 평균속도의 크기에 상관없이 이 데이터가 어느 정도 교란되어 있는 것은 일반적이다.

본 연구와 같은 방법의 속도 측정의 경우 분진 입자의 크기가 고르지 않아서 표준편차를 더 크게 하였을 가능성이 있으나 실험방법에서 기술한바와 같이 집진시 크기가 10 $\mu$ m 이상의 분진은 서로 응집하여 커져 그 수가 현저히 줄어들고 본 측정의 경우 크기가 150 $\mu$ m 이상인 입자에서는 데이터를 받지 않게 하였다. 따라서 분진 입자의 크기가 10 $\mu$ m 이하인 입자들로부터 주로 데이터를

Table 2. Standard deviation of PDPA data for velocity at different locations.

Measured Positions (cm)			X Velocity		Y Velocity	
X	Y	Z	Velocity	Standard Deviation	Velocity	Standard Deviation
- 3	0	0	+ 0.751	2.580	+ 3.618	2.099
- 5	0	0	+ 0.666	3.390	- 0.016	2.384
+ 3	0	0	- 0.242	2.887	+ 0.203	1.762
+ 5	0	0	+ 0.506	3.085	- 0.437	2.110
- 3	+ 20	0	- 0.299	2.386	- 0.698	1.650
- 5	+ 20	0	- 0.330	2.698	- 0.585	1.687
+ 3	+ 20	0	- 0.342	2.337	- 1.231	1.580
+ 5	+ 20	0	- 0.173	2.802	- 0.596	2.002
- 3	0	+ 8	- 0.278	1.475	+ 0.203	1.115
- 5	0	+ 8	- 0.376	1.828	- 0.096	1.303
+ 3	0	+ 8	- 0.035	0.995	- 0.320	1.091
+ 5	0	+ 8	+ 0.104	1.021	- 0.360	1.141

받게 되어 입자 크기의 영향은 상당히 완화되었다고 생각한다. 본 실험의 세라믹 캔들 필터가 5-10 $\mu\text{m}$  크기의 분진을 집진하고 있으니, 분진 입자의 크기를 전부 5 $\mu\text{m}$  이하로 할 경우 많은 입자들이 세라믹 캔들 필터의 기공을 통과하게 되어 세라믹 캔들 필터를 이용한 집진 시스템에서 실제 일어나는 현상과 다르게 된다.

### 3.3 분진 투입위치에 따른 영향

앞에서 설명한 것과 같이 분진을 압력용기부의 중심부에 투입시켰을 때 투입구 쪽 필터 표면의 중심에 dust cake층이 집중적으로 발달한다.

이것은 실제 상용규모의 집진 장치에서 필터 파손의 원인이 되는 ash bridge등으로 작용하게 될 것으로 여겨진다. 따라서 필터에 dust cake층이 없는 상태에서 분진의 투입위치를 필터 상부(Y=40.2cm), 중앙(Y=0cm) 그리고 하부(Y=-35.8cm)로 각각 변화시키면서 분진 속도를

측정하여 분진 투입 위치에 따른 영향을 분석하였다.

측정은 Z=0인 단면에서 X축 방향으로 2cm, Y축 방향으로 5cm 간격으로 측정하였다.

분진을 압력용기부의 상부에서 투입시켰을 때는 투입구가 위치한 부분에서 아래쪽으로 5cm 이상에서는 분진의 분포가 적기 때문에 측정이 불가능해서 Fig. 8에 포함시키지 않았다. 이것은 분진이 압력용기 전 영역에 고르게 분포되지 않는다는 것을 의미하며, 투입구의 위치가 적절하지 못하다는 것을 설명하고 있다.

분진을 하부에서 투입시켰을 때(Fig.8의 (b)) 투입구가 위치한 부분에 형성된 와류는 중심부에서 분진을 투입시켰을 때(Fig.8의 (a)) 투입구가 위치한 부분에 형성된 와류보다 작음을 볼 수 있다. 그리고 분진을 하부에서 투입한 경우가 Fig. 8에서 보듯 전 측정 영역에서 고른 분진의 속도분포를 볼 수 있다.

이상의 결과를 비교해 보면 분진의 투입구를 필터 하단 보다 더 아래 부분에 위치시켜 필터가 투입되는 유

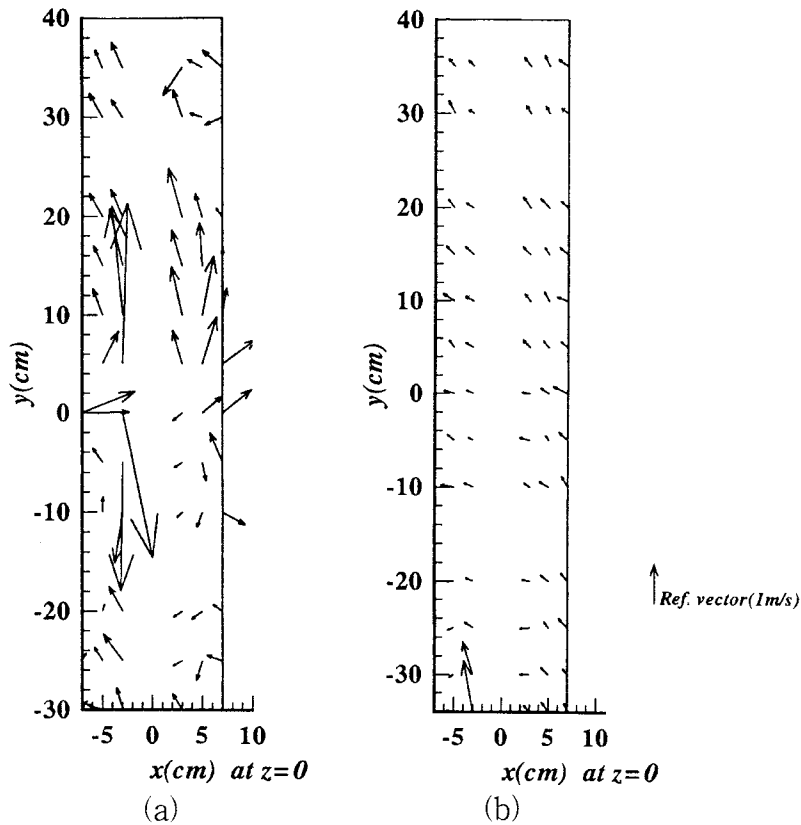


Fig. 8. Velocity vector around ceramic candle filter at Z=0cm (dust inlet position: (a) Y=0cm, (b) Y=-35.8cm)

등의 직접적인 영향을 받지 않도록 함이 바람직하다고 생각된다. 그러나 이 경우에는 압력용기 hopper 영역에서 캔들 필터의 역세정에 의해 떨어져 나온 분진들이 다시 주 유동에 합류할 가능성이 있다.

#### 4. 결론

집진시 세라믹 캔들 필터 주위에 형성되는 분진 속도분포를 PDPA를 이용하여 측정한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 가. 집진시 시간의 경과에 따라 dust cake층이 발달하여 필터표면에서 속도가 작아짐을 알 수 있었다. 특히 투입되는 유동의 직접적인 영향을 받는 부분에서는 역세정시에도 dust cake층이 필터표면으로부터 분리되지 않고 계속 발달함을 관찰할 수 있었다.
- 나. 압력용기 분진 투입구에서 유입되는 흐름의 영향을 받는 필터표면에서의 분진 속도는 다른 부분보다 최대 7~8배정도 큰 값을 나타냈다. 따라서 이 영역에서 필터가 파손될 가능성이 매우 클 것으로 생각된다.
- 다. 압력용기 상단으로부터 83.5cm 위치 즉 압력용기 하단에 위치한 투입구로 분진을 포함한 공기를 투입하였을 때 다른 위치의 투입구를 사용하였을 때 보다 압력용기 전 영역에서 균일한 분진의 흐름을 나타내었다. 따라서 압력용기 안에서 균일한 분진 흐름과 필터표면에 dust cake층이 불 균일하게 발달하는 것을 방지하기 위해서는 분진 투입구가 필터 하단 보다 더 아래 부분에 위치하여야하며, 또한 필터가 투입되는 유동의 직접적인 영향을 받지 않아야 함을 알 수 있었다.
- 라. 세라믹 캔들 필터 주위의 분진 속도분포를 정량적으로 측정함으로써 향후 전산 유체 해석 시 실험값을 제공하여 비교 해석이 가능하며, 결과의 신뢰도를 높일 수 있다.

본 연구에서 세라믹 캔들 필터 주위의 분진 속도 분포에 대한 기초 데이터를 얻을 수 있었다. 향후, 집진과 역세정이 연속적으로 반복되고 있는 상황에서 시간에

따라 분진 속도분포, 분진층 두께, 집진 속도 및 압력이 어떻게 변하는지를 규명하는 것이 필요하다고 생각된다.

#### 후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 도와주신 전력연구원 여러분들과 정현일씨께 감사사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 김종영, 정진도, 정현일 외, 1997, "석탄가스화 복합 발전 기술개발(I) (부록X : 석탄가스화 복합발전용 고온고압 집진 기술 개발)", 한국전력공사 전력연구원.
- (2) J.H. Choi, S.T. No, J.D. Chung, & C.Y. Kim, 1996, "The Pulse Jet Cleaning Behavior in the Ceramic Candle Filter for IGCC," J. of the Society of Chemical Engineers of Japan, Vol. 1, D 17, pp. 267-270
- (3) C. Kanaoka, N. Furuuchi, & J. Murai, 1994, "The Dust Cleaning Mechanism of Pulse Jet Type Back Filter," J. of the Society of Power Technology, Vol. 31, pp. 424-427
- (4) S. Berbner, T. Pilz, & F. Loeffler, 1995, "Investigation into the Filtration & Regeneration Behavior of Rigid Ceramic Barrier Filter at High Temperature," 3rd European Symp. Separation of Particulates from Gases, pp. 63-65
- (5) S. Ito, 1993, "Pulse Jet Cleaning & Internal Flow in a Large Ceramic Tube Filter," Gas Cleaning at High Temperature, Ed. by R. Cliff & J.P. Seville, Surrey, pp. 266-279
- (6) S. Laus, B. Giernoth, H. Bulak, U. Rentz, 1993, "Aspect of Pulse Jet Cleaning of Ceramic Filter Element," Gas Cleaning at High Temperature, Ed. by R. Cliff & J.P. Seville, Surrey, pp. 225-229
- (7) 최주홍, 1997, "PFBC 집진 기술개발 현황 및 과제", 한국에너지공학회지 제6권 제1호 pp. 1~10.

- (8) 정진도, 최주홍, 1995, "석탄가스화 및 연소가스의 집진을 위한 세라믹 필터 집진 기술 평가(1)," 대한 환경공학회논문집, 제17권 8호.
- (9) S. Laux, H.P. Schiffer & U. Renz, 1991, "Performances of Ceramic Filter Elements for Combined Cycle Power Plant High Temperature Gas Clean-Up," Proceedings 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, pp. 959-969
- (10) O.J. Tassicker, G.K. Burnard, A.J. Leitch & G.P. Reed, 1989, "Performance of a Large Filter Module Utilizing Porous Ceramics on a PFBC," Proceedings 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion, pp. 479-486.
- (11) 정현일, 1996, "석탄가스 고온정제 기술개발", 한국 전력공사 해외교육보고서.
- (12) DOE/EPRI, 1996, "Overview of Hot Gas Filter Experience at Tidd", Material & Components in Fossil Energy Applications, No. 120 February.
- (13) 류제형, 최도형, 1997, "세라믹 여과제 집진 장치내의 유동해석," 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회 논문집 B, pp. 228-233.
- (14) 서태원, 정진도, 최주홍, "고온가스 청정 캔들 필터 주위 유체유동 해석," 대한기계학회 1997년도 춘계 학술대회논문집 B, pp. 345-350.
- (15) 최태민, 김상진, 박무룡, 1993, "위상도플러법에 의한 입자의 크기측정" 대한기계학회지 제33권 제12호 pp. 1076~1085.
- (16) W. D. Bachalo and S. V. Sankar, 1988, "Analysis of the scattering interferometry for spheres larger than the light wavelength" Presented at the Fourth international symposium on the application of laser techniques to fluid mechanics.
- (17) W. D. Bachalo and S. V. Sankar, 1994, "Factors affecting the measurement resolution and accuracy of the phase doppler particle analyzer" The second international conference on fluid dynamics measurement and its applications, Baijing, China.
- (18) K. M. Ibrahim, W. D. Bachalo, 1994 "Time-Frequency analysis and measurement accuracy in laser doppler phase doppler signal processing applications." Presented at the seventh international symposium on the application of laser techniques to fluid mechanics.
- (19) 정진도, 이중범, 김종영, 1996, "세라믹 캔들 필터 집진 전후 Ash의 크기 및 분포에 관한 연구," 대한 기계학회논문집, Vol.20, No.6, pp.278-281
- (20) J. Chung, 1997, "Experimental Result of High Temperature Bench Scaled Dust Removal System using Ceramic Candle Filter," J. KSEE, Vol. 2, No. 1, pp. 33-40