

고온 고압 집진을 위한 역세정 유동장의 특성에 관한 연구

A Study on the Reverse Cleaning Flow Characteristics for High Temperature and High Pressure Filtration

김 장 우* · 정 진 도 · 김 은 권¹⁾
호서대학교 환경공학과, ¹⁾호서대학교 환경공학과 대학원
(2002년 3월 7일 접수, 2002년 12월 18일 채택)

Jang-Woo Kim*, Jin-Do Chung and Eun-Kwon Kim¹⁾
Department of Environmental Engineering, Hoseo University
¹⁾*Department of Environmental Engineering, Graduate School, Hoseo University*
(Received 7 March 2002, accepted 18 December 2002)

Abstract

Ceramic filter has been demonstrated as an attractive system to improve the thermal efficiency and to reduce the effluent pollutants. Removal of particulates from the hot gas stream is very important in air pollution control. In particular, the elimination of the particulate matters discharged from a gas turbine at high temperature can prevent the corrosion inside the IGCC.

In this study, a Lab. scale test and numerical simulation were carried out to comprehend the relationship between pulse jet pressure and recovery of pressure drop and to characterize the reverse cleaning flow through a ceramic filter element under high temperature and high pressure. When the pulse-jet pressures were 2, 3 and 4 kg/cm², the cleaning effect increase of about 10~30% by recovery of pressure drop caused by pulse pressure. Cleaning effect at 450°C was greater than that at 550°C or 650°C for the same pulse pressure. According to the result of the present simulation, high pressure has been formed in terminal and central regions in our models and temperature distribution caused by pulse air is to be uniform comparatively on inner surface of filter.

Key words : Ceramic filter, Filtration efficiency, Pulse-jet, Numerical simulation

1. 서 론

석유와 천연가스를 주로 하는 에너지 자원의 한계를 극복하기 위해서 대체 에너지 개발 및 에너지의 효율적 이용에 세계적인 관심이 고조되고 있으

며, 석탄의 청정한 이용은 가장 가까운 장래에 활용될 수 있는 시스템 중의 하나로서 각광 받고 있다. 그러나 석탄을 에너지로 사용할 때에는 많은 환경적 문제점이 발생하며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 차세대 대표적인 석탄 이용 발전 시스템으로 석탄 가스화 복합 발전 기술(IGCC: Integrated Coal Gasification Combined Cycle)이 있다(Chung, 1996; Ito and Tanaka, 1990). 석탄 가스화 복합발전 시스템

* Corresponding author
Tel : +82-(0)41-540-5747, E-mail : jwkim@office.hoseo.ac.kr

의 경우에는 고온고압에서 석탄을 가스화 하여 정제한 후에 450°C, 25 bar의 조건에서 다시 연소하여 고온고압의 가스를 생성한다. 따라서 석탄 가스화 복합발전에서의 집진은 가스화기에서 발생하는 분진을 제거함으로써 가스터빈의 수명을 연장하고 환경 규제치를 만족시키기 위한 필수적인 공정이다 (정진도와 김중영, 1997).

현재 개발중인 여러 집진 시스템 중 세라믹 필터는 기계적 강도, 열 및 화학적 저항성, 그리고 열 및 기계적 충격 저항성을 유지하면서 적당한 크기의 기공을 발달시켜 고온 고압에서 요구되는 절대 효율을 추구할 수 있다 (Ito, 1993). 세라믹 필터 집진기의 이용에 관한 선진국의 경우 필터의 개발, 시스템의 적용, 설계 기술 등 많은 연구가 진행 중에 있으나, 국내의 경우 상용화에는 보다 많은 연구가 필요한 실정이다. 특히 필터 표면에 포집된 분진을 필터의 내측으로부터 공기를 역류시켜 제거할 때의 역세정 효과는 역세 유속에 지배되므로 단시간에 역세정이 가능한 고압 펄스 제트 방식이 일반적이다. 고압 펄스 제트에 의해 형성되는 유동장의 형상에 관한 연구는 아직 미진하다.

따라서 본 연구에서는 Fly ash를 이용하여 전기로에서 고온으로 집진을 행하여 필터와 시스템 자체 내의 내구성 및 성능에 관한 기초 실험을 수행하고, Lab. scale의 역세 시스템을 설계하여 여러 가지 여과 조건에 대한 압력 손실을 측정하며, 같은 조건하에서 수치해석을 통해 실험결과로부터 얻을 수 없는 노즐의 분사압이 필터 표면에 미치는 구체적 영향 및 이때 형성되는 내부 유동장 등을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구방법

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 그림 1과 같다. 고온의 조건을 형성하기 위해 전기로 안에 유입된 ① 필터 집진부와 압축기에서 발생된 역세용 공기량을 조절하는 레귤레이터와 역세 간격을 조정하는 솔레노이드 밸브로 구성되며, 필터 내면으로부터 15cm 하부에 내경 1mm인 직관형 노즐이 설치된 ② 역세 시스템부, 일정량의 입자를 공급하기 위해 레귤레이

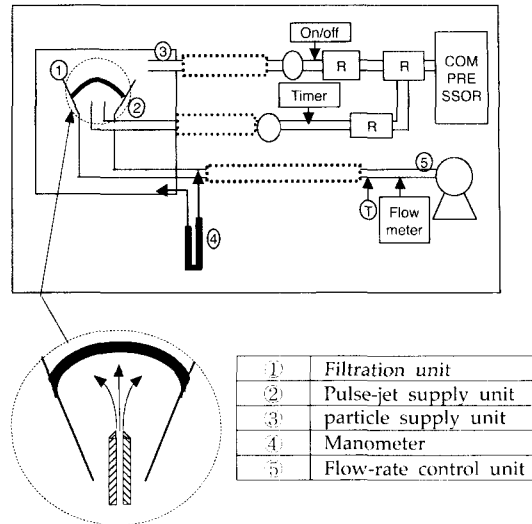


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Ceramic candle filter specification.

Items	Specification
Filter model	DIA-SCHUMALITH 20 single filter
Properties	Porosity: 36% Specific permeability: $6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Filter dimension (outer Dia./inner Dia. × length)	$\Phi 0.06 \text{ m} / \Phi 0.04 \text{ m} \times 1 \text{ m}$

터와 솔레노이드 밸브로 구성된 ③ 입자 공급 장치부 그리고, 집진 수행시의 입자 퇴적에 의한 압력손실과 역세에 의한 압력손실의 변화를 관찰하기 위한 U자관 마노미터가 설치된 ④ 압력 측정부, 여과 속도를 조정하기 위한 유량계와 펌프로 구성된 ⑤ 유량 조절부로 나누어진다.

필터 집진부에서는 실험 수행시 온도는 각 450~650°C까지 변화하여 실험하였으며, 역세를 실시하는 압력손실은 400 mmH₂O로 하였다. 전기로에서 집진시 온도의 조건을 결정한 후 펌프와 유량계를 통하여 여과 속도를 결정하고, 입자 공급 장치로부터 전기로 안으로 분진 입자의 유입이 이루어진다. 실험의 실시 후 압력 손실의 변화를 관측한 후 역세에 필요한 압력에 도달하였을 때 역세를 실시하게 되며, 이 때의 압력 손실의 변화를 관측하였다.

집진에 사용된 세라믹 필터는 독일 Schumacher 사의 것으로 사양은 표 1과 같고, 실제 실험에 사용된 부분은 캔들형 DIA-SCHUMALITH 20 Single Filter의 원주의 일부분을 절단한 것으로 크기(원주 방향×길이)는 내측면 기준 4.1×3.1 cm²이며, 두께는 1 cm이다.

2. 2 수치 해석

2. 2. 1 지배방정식 및 계산 방법

고온 고압 하에서 집진이 이루어지는 세라믹 필터의 경우, 고압의 역세정류에 의해 필터내부 공기의 밀도 변화가 예측되므로 지배방정식에 에너지 방정식을 포함시켜 밀도의 변화에 의한 온도영향의 영향을 규명해야 한다. 그러므로, 본 연구에서의 지배 방정식은 에너지 방정식을 포함시킨다. 공간 차분 해법으로는 충격파를 포함하는 유동장의 수치 유속(numerical flux)을 계산하기 위해 가장 일반적으로 이용되는 방법인 Yee-Harten의 풍상형 TVD(Total Variation Diminishing) 스킴을 이용한다. 여기서 TVD 스킴은 비선형 보존 방정식의 안정성을 유지하기 위해 전변동 성분(total variation)이 증가하지 않도록 하여 계산의 안정성을 확보한 것이다(Yee and Harten, 1987).

시간 차분 해법으로는 연산자 분할(Fractional step)법을 이용한다. 이 방법은 다차원 공간 문제의 안정성을 개량하는 양적(explicit) 방법의 한 가지로서 국소적으로 1차원으로 분해하는 개념을 이용하는 것으로, 이 방법을 이용하면 비정상 계산이 가능해져 시간에 따른 유동장의 변화를 알 수 있는 시간 2차 정도(accuracy)를 실현할 수 있다. 이러한 양적 알고리즘을 이용하는 경우, 계산을 안정화시키기 위해서는 엄격한 시간 스텝(time step)의 제한이 필요하며, 본 연구에서 사용한 CFL 안정조건은 다음과 같다(Zhang and So, 1991).

$$\Delta t = \frac{C_{CFL}}{(\sqrt{u^2 + v^2} + a)_{\max} \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2}} \quad (1)$$

쿨란수(courant number) Δt 가 1보다 작으면 스킴은 안정된다. 본 연구에서 C_{CFL} 은 0.9로 한다. 정상 계산에 대해서는 해의 수속성을 향상시키기 위해 각 격자점에 대해 국소적으로 상이한 시간 스텝을

적용시키며, 비정상 계산에 대해서는 식(1)에 의해 계산된 국소 시간 스텝 중 최소값(Δt_{\min})을 전 계산 영역에 적용시킨다.

난류모델은 레이놀즈 전단응력에 대한 상미분 방정식을 도입하여, 박리류에서 난류의 대류와 확산과 같은 비평형 효과를 계산에 포함시킨 Johnson-King 1/2 방정식 모델을 이용한다. 이 모델은 비평형 대수 모델로서 대수 모델의 특징인 낮은 코스트에 비해 좋은 성능을 가지고 있다(Johnson and King, 1985).

2. 2. 2 경계 조건 및 계산 조건

필터 내부의 대칭선을 경계로 하단면을 대칭면으로 가정하여 대칭조건을 사용하였고, 고체 벽면과 필터부의 경계면에는 미끄럼 현상이 존재하지 않아 벽면 상에서 속도를 0으로 가정하는 접촉(no slip) 조건을 사용하고 단열면으로 가정하였다. 그리고, 필터의 경계면에 대해서는 Darcy의 모델을 적용하였으며, 필터의 투과율은 $6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 로 하였다(Ito and Tanaka, 1990).

계산의 초기 조건으로 필터 내부 유동장의 압력은 대기압 하에서 집진을 수행하여 압력손실로 인해 필터 내부와 외부의 압력 차가 400 mmH₂O 일 때 필터 내부에 형성되는 압력이고, 이 때 온도는 650°C이다. 노즐로부터 분사되는 공기의 압력은 4 kg/cm²과 2 kg/cm², 온도는 상온으로 가정한다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 고온분진 시료의 특성

본 연구에 사용된 부유 분진(Fly ash)은 보령화력의 전기 집진기에 포집된 것으로, 크기가 73 μm 이하였으며, 9 μm 입자 이하의 수능도는 전체의 85.6%이었다. 그림 2의 부유 분진 입도 측정 결과에서 나타난 것처럼 아주 정상적인 Gaussian분포를 즉, Log-normal 분포를 나타내고 있다. 평균 입경은 3.44 μm이고 이 때의 표준 편차는 1.931이었다.

그림 3은 세라믹 필터를 통해 집진을 수행하기 전과 고온에서 집진을 수행한 후필터를 통과하지 못하고 필터의 표면에 축적된 성분을 이용해 분석한 결과로서 실험 전후의 차 만큼 세라믹 필터에

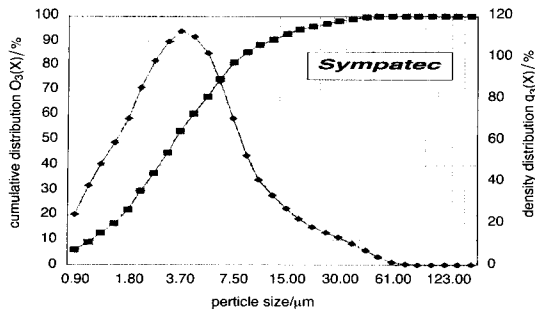


Fig. 2. Size distribution of fly ash particle.

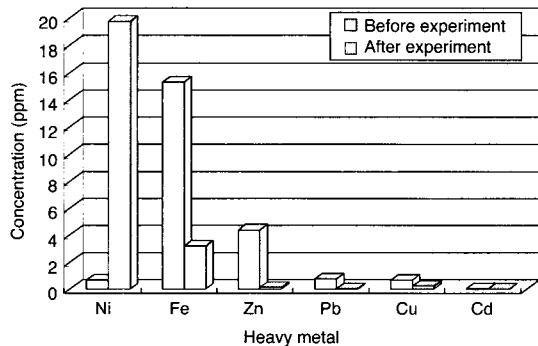


Fig. 3. Concentrations of the heavy metal constituents in fly ash before and after experiments.

의해서 집진되었음을 나타낸다. 그림으로부터 Fe, Zn, Pb 및 Cu의 농도가 급격히 감소를 보여 700°C 이상의 고온에서도 세라믹 필터를 이용한 집진에 의해 중금속 농도가 감소하는 것으로 입증되었다. 그러나 Ni의 농도가 증가를 보인 것은 700°C 이상의 고온에서는 Ni의 용출율이 감소함으로써 농도가 증가한 것으로 생각되나, 실험 후의 농도가 증가한 원인은 세라믹 필터 샘플의 고정을 위하여 스테인레스(Stainless) 철판에 용접한 곳이 장시간 850°C의 고온에 노출되면서 증가를 보이는 것으로 생각되어 향후 조사되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 세라믹 필터로 집진을 수행시 대부분의 중금속 농도가 감소를 보이며 환경오염 저감에 유익할 것으로 판단된다.

3.2 압력손실 변화특성

그림 4는 실험온도(전기로 내의 온도)가 각각

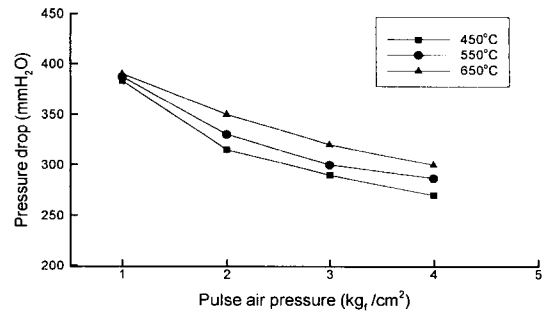


Fig. 4. Variation of pressure drop with pulse air pressure at each temperature.

450°C, 550°C, 650°C인 경우에 대해 압축공기의 분사압력을 1, 2, 3, 4 kg/cm²로 하였을 경우, 압력 손실의 변화를 나타낸 것이다.

일반적으로 압력손실은 온도와 비례하나 본 연구에서는 역세를 압력 손실이 400 mmH₂O에 도달하였을 경우 실시하였다. 450°C의 경우 분사 압력이 1 kg/cm²일 경우에는 압력 손실의 변화가 2.5%이었으며 2, 3, 4 kg/cm²의 경우에는 각각에 대하여 21.25%, 27.5%, 32.5%로 증가하는 것으로 나타났다.

집진 온도가 550°C인 경우, 450°C의 실험 결과와 같이 분사 압력이 1 kg/cm²일 경우에는 역세척 효과가 미미하나, 분사 압력을 2, 3, 4 kg/cm²로 증가시켰을 경우 20%, 25%, 27.5%로 역세의 효과가 증가하였다.

집진 온도가 650°C의 경우도 450°C와 550°C의 실험 결과와 같은 경향을 보이고 있으나, 2, 3, 4 kg/cm²의 압력 손실의 변화를 측정된 결과 12.5%, 20%, 25%로 같은 분사 압력에서 450°C와 550°C의 압력 손실의 변화보다 작은 경향을 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 온도가 높은 영역에서는 역세 압력의 변화에 따른 세척효과가 적은 것으로 판단된다.

3.3 수치해석의 결과

3.3.1 정상계산 (Steady state calculation)

노즐로부터의 분사 공기의 압력이 4 kg/cm²일 때의 정상계산에 대한 결과를 나타낸다. 그림 5는 고온 분위기내의 노즐로부터 15°C의 압축 공기가 분사되어 형성된 유동장의 마하수(Mach number) 분포

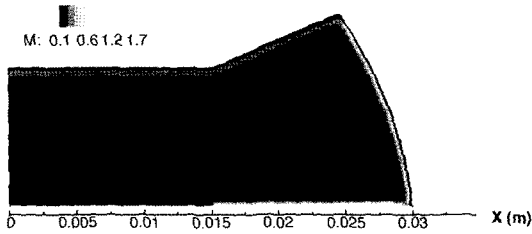


Fig. 5. Mach number contour.

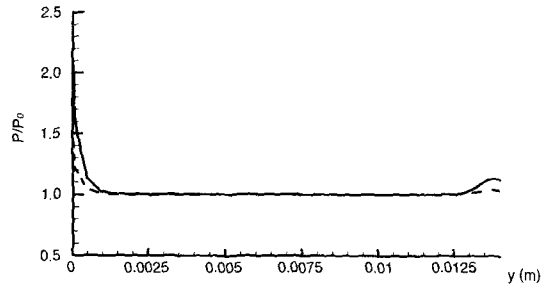


Fig. 7. Distribution of the pressure ratio on filter inner surface.

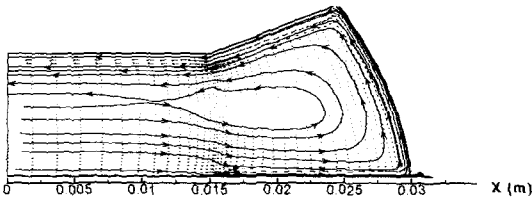


Fig. 6. Velocity vector and stream lines.

를 나타낸 것이다. 노즐부로부터 분사된 압축 공기의 압력에너지가 분사 노즐의 선단부에서 속도가 마하 1.15에 달하는 속도에너지로 바뀌어 대칭면과 필터 내부표면 그리고, 고체 벽면을 따라 고속의 유동이 형성된 것을 알 수 있다. 또, 이 고속의 역세정류는 대칭선을 따라 필터 내부 벽면에 부딪친 후, 벽면을 따라 필터의 끝단으로 이동하며, 이 과정 중 필터의 중심부와 끝단에 가장 높은 압력을 형성시킨다. 이로부터 노즐부에서 분사된 역세정류는 필터의 내부표면 전체에 걸쳐 직접적인 역세정 효과를 만들어 내지 못하고, 역세정류의 속도에너지가 다시 압력에너지로 바뀌는 필터의 중심부와 필터의 끝단(고체 벽면과의 접면) 부근에서 큰 역세정 효과를 나타낼 수 있다. 초음속으로 분사된 역세정류는 노즐의 선단부분을 통과하며 유로 확장으로 인해 유동장의 대부분의 영역에 걸쳐 아음속($M < 1$)을 나타내나, 노즐 선단으로부터 조금 떨어진 곳에 국소적으로 음속보다 빠른 초음속의 영역이 존재하고 있다.

그림 6은 필터 내부 유동장의 속도 벡터와 유선을 나타낸 것으로 노즐로부터 분사된 고압의 공기에 의해 형성되는 유동장의 형상을 알 수 있다. 노즐로부터 분사된 고압의 공기가 대칭면을 따라 필

터의 내부면에 충돌하여 필터의 내부 벽면에 접선 방향으로 흐름의 방향이 바뀐다. 그리고 이 과정에서 형성되는 동반류와 동반류의 반대 방향으로 형성되는 흐름을 유선을 통해 알 수 있었다. 분사 속도는 노즐을 나온 직후에는 약 450~500 m/s이고, 이 때 형성되는 동반류의 속도는 노즐 주위에서 25~30 m/s이며, 노즐 반대방향에 형성되는 여과 방향의 유속은 30~45 m/s이다. 이것은 노즐에서 분사되는 공기와 동반류가 필터 내면에 압력으로 작용한 후, 여과 방향으로 유동할 때 유로의 면적이 그림 6에 도시된 유선으로부터 알 수 있듯이 동반류 유로의 면적보다 상대적으로 작기 때문이다.

그림 7은 역세척 후 표면압력을 역세를 실시하기 전의 필터 내부압력으로 나눈 압력비를 나타낸 것으로 그 값이 클수록 큰 역세압력이 작용하여 역세 효과가 큼을 나타낸다. 그림의 가로축의 y는 대칭면으로부터 필터의 내부 표면까지의 거리를 나타낸다. 실선이 노즐로부터의 분사 압력이 4 kg/cm^2 인 경우이고, 점선이 2 kg/cm^2 인 경우로서, 두 경우 모두 필터부의 중심과 끝단에서 높은 값을 나타내나, 분사 압력이 높은 경우가 상승 폭이 크다.

3.3.2 비정상계산 (Unsteady state calculation)

그림 8과 9는 노즐로부터의 분사 압력이 각각 4 kg/cm^2 과 2 kg/cm^2 인 경우, 분사 개시로부터 60 ms 후의 마하수의 분포를 나타낸다. 두 그림에서 알 수 있는 것과 같이 분사 압력이 높은 경우가 운동 에너지가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 역세시간이 60 ms 이후에도 유동장 자체의 큰 변화는 거의 없으며, 이는 분사 시작부터 역세 작용이 본격적으로 이루어



Fig. 8. Mach number contour (Injection pressure is 4 kg/cm²).



Fig. 10. Mach number contour (Injection pressure is 4 kg/cm²).

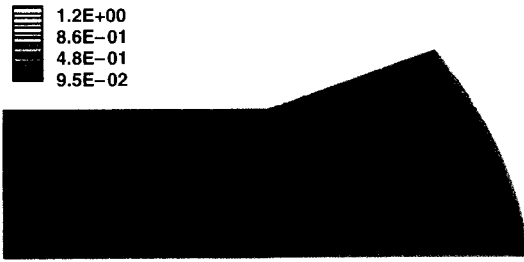


Fig. 9. Mach number contour (Injection pressure is 2 kg/cm²).

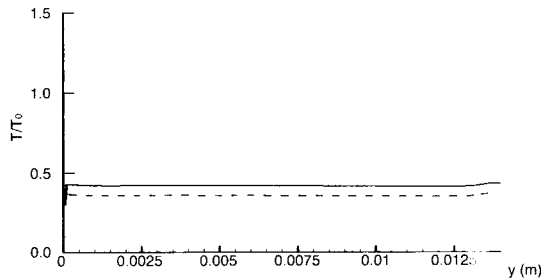


Fig. 11. Comparison for temperature ratio on inner filter surface (injection pressure is 4 kg/cm²).

질 때까지의 소요 시간이 매우 짧음을 의미하며, 거의 정상 상태 (steady state)에 도달하여 역세작용을 하고 있음을 의미한다. 그림 10도 같은 조건하에서의 계산 결과로서, 노즐로부터 분사된 고압의 공기가 대칭면을 따라 필터의 내부면에 충돌한 후, 필터의 내부 벽면을 따라 유동하는 그림 8의 결과와 유사한 유동장을 형성함을 알 수 있다. 이는 유로 면적의 변화가 필터 내부벽면 주위의 유동 형태에 미치는 영향이 크지 않음을 나타내며, 분사노즐에서 분사된 공기가 가지는 큰 운동에너지로 인해 유로의 변화에 의한 발생하는 영향이 필터 내면 주위의 유동장의 형태에는 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 생각된다.

그림 11은 노즐의 분사 압력이 4 kg/cm²일 때, 역세 노즐 선단부까지의 유로 면적을 1/2 (0.5 cm)로 한 계산 모델의 차이(그림 1의 ②)에서 발생하는 유동장의 변화를 온도비로 나타낸 것이다. 압력비는 전반적으로 일치하나, 온도비는 그림 8의 모델(실선)이 그림 10의 모델(점선)의 경우에 비해 1에 가

깝게 위치한다. 이것은 필터 내부 표면의 온도차가 그림 8의 모델이 작은 것을 의미하나, 차이는 매우 적은 것으로 나타났다.

4. 결 론

Lab. scale의 역세 노즐 세라믹 필터 실험 장치를 제작하여 역세시 압력 손실의 변화를 측정하고, 2차원의 수치 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험적 연구에서 역세시 분사 압력이 1 kg/cm²의 경우 대부분의 온도 조건에서 약 2.5%의 압력 손실의 변화를 보임으로써, 역세의 효과가 거의 나타나지 않는 것으로 판단되며, 이후 분사 압력이 2, 3, 4 kg/cm²로 커질수록 역세의 효과는 450°C의 조건에서 21.75, 27.5, 32.5%, 550°C의 조건에서 20, 25, 27.5%, 650°C의 조건에서는 12.5, 20, 25% 증가함을 알 수 있었다. 또한 450°C, 550°C, 650°C의 조건에

서 실험한 결과, 온도가 450°C의 경우에서 가장 좋은 역세의 효과를 나타냈으며, 역세기 온도가 감소할수록 같은 분사 압력의 조건에서 역세의 효과는 약 3~8% 증가하는 것으로 나타났다.

수치 해석을 통해서 본 연구의 실험을 통해서 알 수 없었던 고압의 역세정류에 의해 형성된 필터 내부의 유동장의 형태를 알 수 있었고, 이 유동장의 형태로부터 노즐에서 분사된 저온 고압의 공기는 대칭선을 따라 필터 내부 벽면에 부딪친 후, 벽면을 따라 필터의 끝단으로 이동하며, 이 과정 중 필터의 중심부와 끝단에 가장 높은 압력을 형성시키므로, 실제 역세기 필터의 중심부와 끝단에서 분진의 탈진현상이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 또, 노즐의 분사 압력이 높으면, 노즐 내부면의 압력은 중심부와 끝단에서만 상승하고 온도는 내부면 전체에 걸쳐 하강함을 알 수 있었다. 또한 유로의 면적이 다른 두 가지 모델에 대해 역세기 필터 표면의 압력비는 비슷하나, 유로가 큰 쪽이 필터 표면의 역세 전의 것과 비교해 온도차이가 적어 더 우수함을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 에너지 관리공단에서 지원하는 '99년도 에너지기술진흥사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 정재화 (1998) 다공성 세라믹 필터에서의 역세정 유동특성 수치해석, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 723-728.
- 정진도, 김종영 (1997) 석탄가스화 복합발전 기술개발 (1), 전력연구원.
- 정진도, 이중범, 김종영 (1995) 석탄가스화 및 연소가스용 집진 장치의 Pulse jet Cleaning 연구, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 284-289.
- Chung, J.D. (1996) Process Evaluation for Current Ceramic Filter and Granular Bed Filter for High Temperature High Pressure Application, *Energy Eng*, 5(2), 138-145.
- Ito, S. (1993) Pulse Jet Cleaning and Internal Flow in a Large Ceramic Tube Filter, *2nd International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures*.
- Ito, S. and T. Tanaka (1990) A Study of Optimum Size for Large Scale Filtration Equipment in IGCC Power Generation System, *CRIEPI. Report*, EW91003.
- Johnson, D.A. and L.S. King (1985) A Mathematically Simple Turbulence Closure Model for Attached and Separated Turbulent Boundary Layers, *AIAA Journal*, 23(11), 1684-1692.
- Yee, H.C. and A. Harten (1987) Implicit TVD Scheme for Hyperbolic Conservation Laws in Curvilinear Coordinates, *AIAA Journal*, 25(2), 266-274.
- Zhang, H.S. and R.M.C. So (1991) A Flux Coordinate-Splitting Technique for flows with Shocks and Contact Discontinuities, *Computers and Fluids*, 20(4), 421-442.