

A Study on the Performance of Pulse Jet Cleaning in High Temperature Filter

고온 세라믹필터의 펄스젯 탈진 성능에 관한 연구

Byong-Ryol Kim, Seung-Chul Park, Byoung-Chul Park, Hyun-Jun Cho,
Hyoung-Mo Oh, Tae-Won Hwang and Sang-Woon Shin

Nuclear Environment Technology Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseung-Gu, Daejeon
env2100@nate.com

김병렬, 박승철, 박병철, 조현준, 오형모, 황태원, 신상운
원자력환경기술원, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received September 20, 2004 / Approved October 13, 2004)

ABSTRACT

To evaluate parameters influencing on the dust removal of the High Temperature Filter (HTF) system, a computer simulation of fluid dynamics inside the system had been performed. The results showed that the optimum pulse jet periods were 50ms and 90ms for the 1000mm and 1500mm long filter elements respectively. Dust removal effect was very excellent under the pulse jet pressure of 3 bar. But the distance between the pulse jet nozzle and the venturi of a filter element had no meaningful effect on the performance with the variation from 5mm to 10mm. Compared to the dispersion mode of pulse jet, the collective mode of pulse jet flow was preferable in maintaining the pressure inside the system stable.

Key Words : Pulse duration, Pulse pressure, High Temperature Filter

I. 서론

폐기물 연소시 발생되는 배기체내에는 처리조건에 따라 미연탄소, 회, 금속 및 중금속 입자 등의 고상 및 액상 입자들이 포함되어 있다. 이들 미소입자를 가스와 분리하여 제거하는 것을 집진기술이라 부른다. 배기가스 중에 포함된 분진은 일차적으로 대기오염 규제 차원에서 제거되어야 하고 그 규제치가 점차 엄격해지고 있기 때문에 고효율 집진 방식의

적용이 필요하다. 예로서 석탄가스화 복합발전(IGCC)과 가압유동층연소 복합발전(PFBC)의 경우 석탄으로부터 제조된 가스를 정제한 후에 가스터빈을 가동하는데, 이 경우 분진에 의한 가스터빈의 부식과 마모를 방지하기 위하여 고온고압에서 엄격한 정밀 집진이 요구된다. 건조가스 상태에서 입자와 가스를 분리하는 기술로는 여과포 집진기, 금속필터 또는 세라믹 소재의 필터 집진기, 전기집진기, 충전 정전 집진기 등이 있으며, 이들 집진기는 고온고압

조건에서도 활용이 가능한 이점을 갖고 있다. 이중 세라믹 필터를 사용하는 집진기술은 청정 석탄발전 방식인 석탄가스화 복합발전(IGCC)등에서 열효율을 향상시키고, 환경오염을 최소화 할 수 있는 고온고압 집진기술로 응용되며, 기계적 강도, 열 및 화학적 저항성, 그리고 열 및 기계적 충격 저항성을 유지하면서 적당한 크기의 기공을 발달시켜 고온고압에서 요구되는 절대 효율을 추구할 수 있다. 선진국의 경우 세라믹 필터 집진기의 폭넓은 적용을 위해 필터재질의 개발, 다양한 시스템의 적용, 연구 및 현장적용을 위한 설계기술등 많은 연구가 진행 중에 있으나, 국내의 경우 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.^{1,2,3}

본 실험에서 사용된 고온 세라믹 필터는 기존 섬유필터에 비해 필터가 고형화 되어 있기 때문에 별도의 지지체가 필요 없다. 따라서 설치비와 운전비를 현저히 줄일 수 있으며, 약 900℃ 정도의 온도에서도 안정적으로 운전이 가능하다. 또한 기본적으로 세라믹 여과재가 일반 고분자 섬유필터에 비해 화학적으로 안정하고 산성 배가스 분위기에서도 뛰어난 내부식성을 가지며, 1μm 이하의 미세한 먼지입자에서도 높은 제거효율을 갖는다는 장점이 있다.⁴ 고온가스 집진기술의 궁극적인 연구목표는 고온 배가스 집진공정의 장시간 안정적 운전에 있다. 따라서 고온세라믹 필터를 이용한 장시간 안정적 운전을 위해서는 필터의 내구성 및 수명에 영향을 미치는 요인을 파악하고, 안정적 운전을 위한 최적조건을 도출하기 위한 실험이 선행되어야 할 것이다.

본 연구의 목적은 중·저준위 가연성폐기물 유리화시 저온용융로 후단에 고온 세라믹 필터를 장착하여 용융로에서 발생하는 먼지를 효율적으로 제거하고, 탈진장치에 의한 최적의 운전조건을 도출하는데 있으며, 궁극적으로 유리화 상용설비에 설치될 고온 필터 탈진장비 설계를 위한 기본 자료를 얻기 위한 것이다. 따라서 탈진압력 및 분사 노즐의 위치에 따른 필터 여과재 내부의 유동 특성을 알아보고 압축공기 분사모드에 따른 고온필터 내부의 유동변화를 비교 고찰하며, 실증설비에 적용하여 고온세라믹 필터의 운전성능을 확인하고자 하였다.

II. 실험

가. 실험방법

1) 전산모사 해석조건

본 연구를 수행하기 위해 전산유체역학(CFD)에서 범용되는 유체해석프로그램인 FLUENT 6.1을 사용하였다. CFD는 유체의 흐름을 실험에 의한 측정 방법이 아닌 컴퓨터를 이용한 수치 해석 방법을 이용하여 분석하는 것이다. FLUENT는 유체 및 열전달, 물질전달 그리고 화학반응 문제를 해석하기 위해 사용되는 CFD 툴이며, 다양한 범위의 유체 유동을 모델링하는 프로그램이다.

본 연구에서 사용한 해석모델 형상 및 해석인자를 Fig. 1에 나타내었으며, 2차원, 3차원 해석 조건 및 모델로 각각 4가지(2L×2Δ), 1가지(1L×1Δ) 제안모

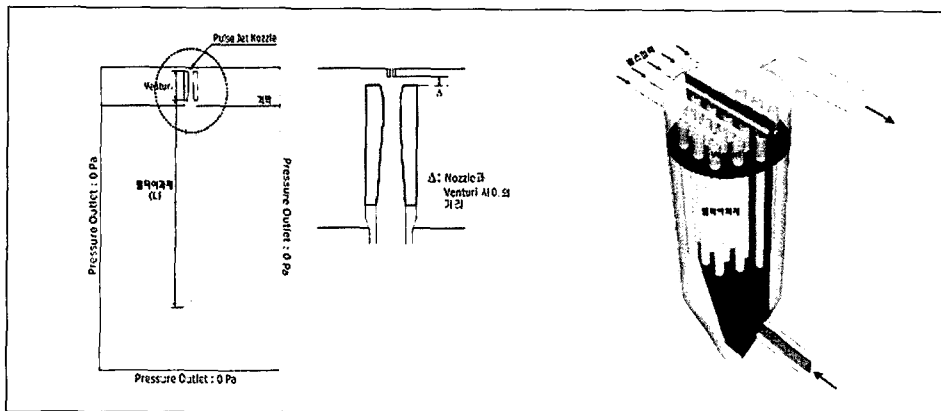


Fig. 1 The 2D, 3D interpretation models and interpretation factors

델을 설정하였다(Table 1).

2) 세라믹필터 역세정 운전조건

세라믹필터 여과집진설비에서 역세정 방법은 설비의 안전운전과 관계되는 필터 차압형성, 필터 스트레스 및 파손에 매우 중요한 역할을 한다. 분진이 포함되지 않은 가스를 여과체에 통과시킬 때 초기 압력강하가 생긴다. 이 압력은 유량에 따라 나타나는 압력으로 잔류특성은 없다. 그러나 분진이 포함된 배기체를 장시간 처리하면 여과체 표면에 분진이 축적된다. 이 축적된 분진층은 다시 영구적으로 잔류하는 영구잔류층(Permanently residual layer)과 여과속도나 운전조건에 따라 일시적으로 잔류되는 조건적 잔류층(Conditionally residual layer)으로 존재한다. 역세정과 역세정 사이의 간격은 사이클 시간(Cycle duration)이라 하고 역세정 밸브가 열려 있는 시간을 펄스시간(Pulse duration)이라 한다. 역세정 방법은 역세정 시간 간격을 동일하게 하여 연속적으로 수행하는 경우(분산법 : Dispersion mode)와 일정 시간이 지난 후에 짧은 펄스시간을 동시에 주어 역세정하는 경우(집합법 : Collective mode)가 있다. 본 유리

화 설비의 경우 기존 고온필터시스템(HTF-A, 영국)의 경우 분산법을 적용하였으며, 신규 고온필터시스템(HTF-B, 독일)은 집합법을 약간 변형한 역세정 방법으로 운전하였으며, 역세정시 원활한 차압유지 및 펄스압력에 의한 필터 스트레스를 최소화하기 위한 운전방법을 도출하고자 하였다.

나. 전산모사 및 실증시험 평가항목

현재 세라믹 필터를 이용한 집진기를 상용설비에 적용하기 위한 실증시험은 candle형 필터와 cross flow 필터등 다양한 연구가 진행되고 있다. 이들 필터는 여러 조건에서 성공적으로 시험되었으나 필터의 파손과 시스템의 설계 미숙이 많이 지적되고 있다.⁵ 따라서 탈진설비에 대한 최적화를 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 고온가스 집진에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있다. 고온가스 집진기술의 궁극적인 목표는 장시간 안정적 운전에 있다. 본 실험에서는 candle형 세라믹 필터를 이용한 여과 집진시스템에서 안정적 운전을 위한 최적의 운전조건을 얻기 위하여 아래와 같이 평가항목을 설정하였으며, 실증

Table 1. Simulation Conditions

구분	2 차 원		3 차 원
필터길이(L)	1000mm	1500mm	1000mm
Nozzle 거리(Δ)	5mm	10mm	10mm
격자종류/구성	Quad / 1.6만개		Hybrid / 120만개
난류모델	Standard κ - ϵ		Standard κ - ϵ
경계조건	입구 Pressure Inlet : 3bar & 1bar		입구 Pressure Inlet : 0Pa, 압축공기 : 3bar
	출구 Pressure Inlet : 대기압		출구 Pressure Outlet : -400Pa

Table 2. Pulse-jet cleaning Operation Conditions

구분	HTF - A	HTF-B
모델명	Cerafil TM XS-1000	Schumalith N 10-20
필터장착수(개)	32	19*
필터면적(m^2 , total)	6.08	4.22
평균유량(m^3/h)	130	140
설정차압(mmH_2O)	250	400
Pulse duration(msec)	250	250
Cycle duration(sec)	12sec \times 5line	12sec \times 5line
Pulse pressure(bar)	3 ~ 5	3 ~ 5

* : 1.0m 9개, 1.5m 10개 사용함.

실험을 통한 특성을 규명하고, 최적인전을 위한 역세정 방법을 확정하고자 하였다.

(1) 압축공기 분사 유지시간(Pulse Duration, msec)에 따른 필터내의 유동변화

(2) 분사노즐과 Venturi 사이의 거리(Δ , mm) 변화에 따른 유동현상

(3) 압축공기 분사 압력(Pulse Pressure, bar)에 따른 유동 전달 강도

(4) 압축공기 분사방식에 따른 유동변화

(5) 실증실험을 통한 역세정 방법 평가

III. 결과 및 고찰

가. 전산모사 분석결과

1) 2차원 해석결과

필터여과재 길이별 유동특성을 고찰한 결과, 필터 여과재 1000mm 에서는 약 40ms 이후부터 분사된 유동이 일정하게 유지되며, 1500mm 인 경우는 약 90ms 이후 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 압축 공기의 펄스 유지시간이 적어도 이 시간

이후까지 지속되어야 효과적인 탈진이 이루어 질 것으로 판단된다(Fig. 2).

분사 노즐과 Venturi 사이의 거리(Δ)를 기존 10mm에서 5mm로 변화시킨 경우 유동에 미치는 효과를 고찰한 결과, 유동 패턴이나 필터 여과재 내 centerline 유속 분포에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 압축공기 분사 압력을 기존 3bar 대비 1bar로 할 경우 분사 초기에는 최대 유속 대비 유속 크기가 작게 나타나서 필터 여과재 내부의 유동 전달 강도가 분사 압력 3bar에 비해 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 시간이 경과할수록 차이는 줄어들지만 여전히 필터 여과재 중앙부까지의 유동 전달 강도는 분사 압력 3bar에 비해 떨어지는 것으로 나타났으며, 유동 최대 도달 위치는 거의 동일한 것으로 나타났다.(Fig. 3)

2) 3차원 해석결과

Fig. 4는 고온필터의 주 기능인 배기가스내의 함유된 미세 입자 여과 기능 작동 시 유적선 및 중앙 단면에서의 유속 분포를 나타낸다. 유적선 분포에서 보는 바와 같이 고온필터 내부로 유입된 배기가스가 필터

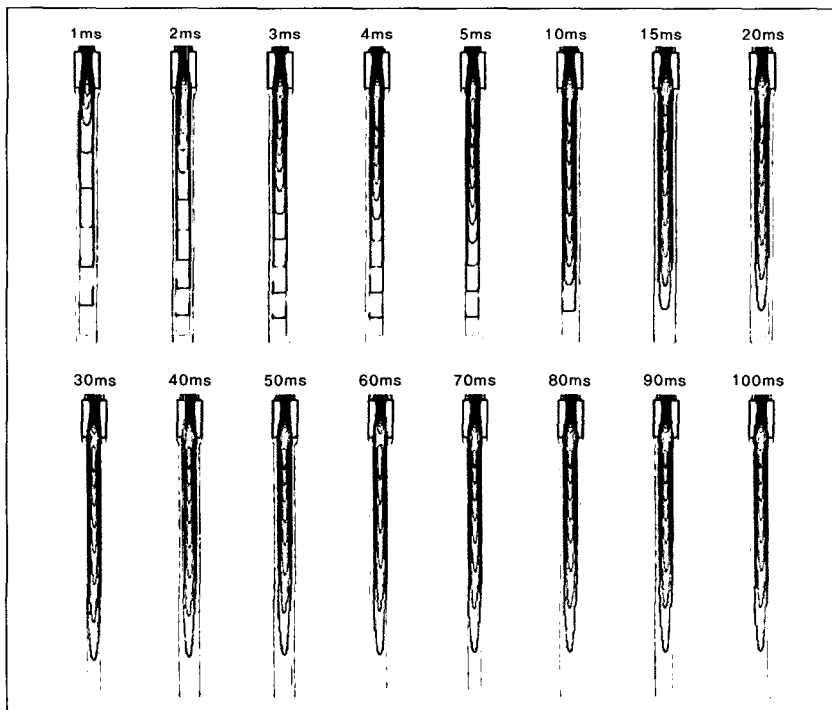


Fig. 2 The flowing change inside filter materials (L=1000mm)

여과재를 통과할 때 치우침 없이 필터 여과재의 상-하단을 고르게 통과하여 출구로 나가는 것으로 나타났다. 따라서 여과된 미세 입자가 필터 상-하단 전 영역에 걸쳐서 침적될 것으로 예상된다. 또한 압축 공기 분사 후 고온필터 내부의 유적선 분포를 보면 분사된 유체가 필터 상단에 비해 필터 하단을 통해서 나가는 것이 두드러지며 따라서 필터 상단에 침적된 입자의 탈진에는 취약할 것으로 판단되며, 분사된 유체가 고온필터 입구까지 미쳐서 역류가 발생하는 것으로 나타났다.

필터 여과재내 펄스 전달 양상을 보면 약 10ms에서 가장 멀리 전달되고 40ms 이후 유동이 거의 동일하게 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 펄스 유지

시간을 적어도 40ms 이상 지속되어야 할 것으로 판단된다.(Fig. 5) 또한 고온필터 내부에 있는 각각의 필터 여과재에 압축 공기를 분사하기 위해서 5열의 분사 채널이 있다. 실제 운전 중에는 5개의 채널을 동시에 분사하는 경우와 1채널씩 시간차를 두고 분사하는 경우가 있는데 두 경우의 차이점을 고찰하였다. 각 경우에 대해 시간에 따른 필터 여과재 내부 유동 변화를 보면 펄스를 1 채널에 입력한 경우 다른 채널의 노즐에서 분사되는 펄스 압력 간섭이 없기 때문에 초기 펄스제트 발달 속도가 전체 펄스 채널을 가동한 경우에 비해 빠른 것으로 나타났다. 또한 펄스 입력시 발생하는 고온필터 입구에서의 역류량도 1 채널 입력시에 현저하게 줄어드는 것으로 나타났다.

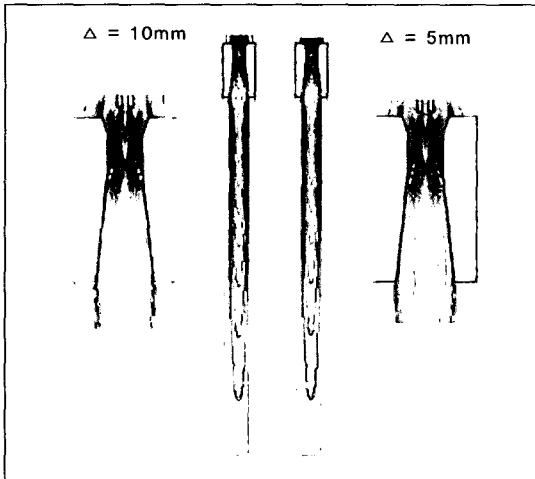


Fig. 3 The change of flowing velocity according to the distance between the filter materials and the nozzle

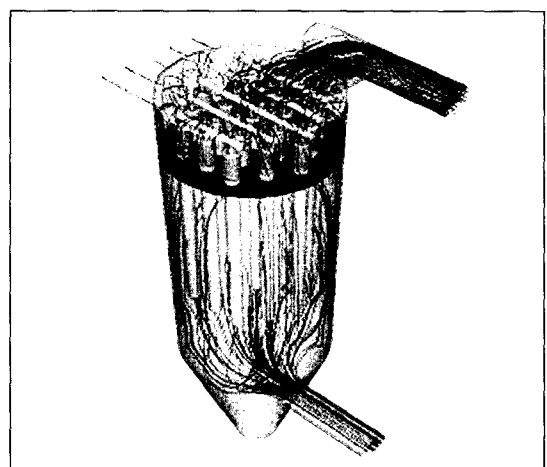
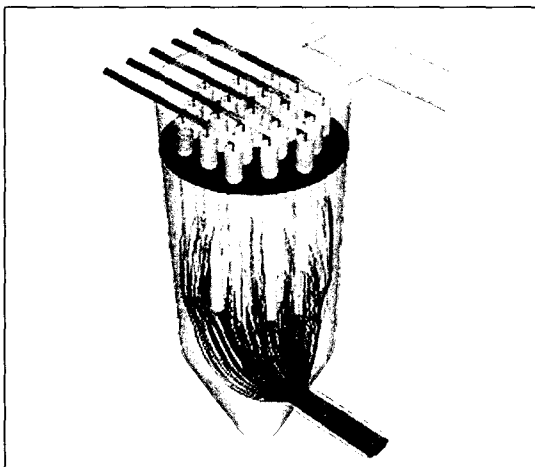
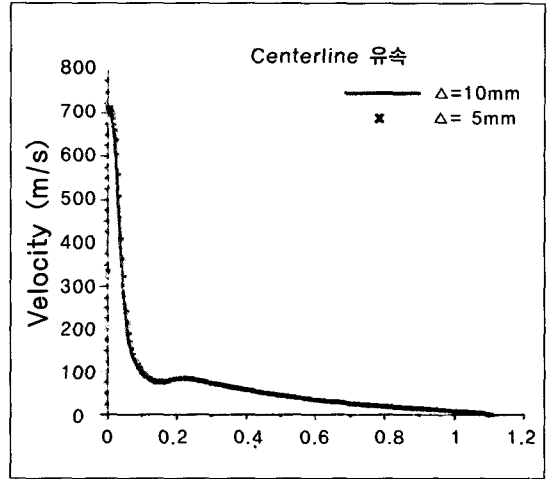


Fig. 4 The flowing mark line distribution after the jetting of compressed air

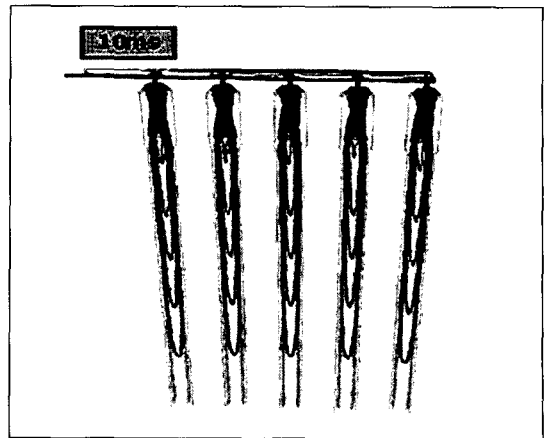
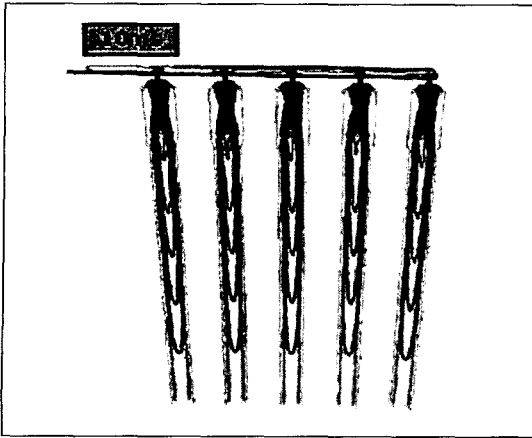


Fig. 5. The flowing change inside filter materials(3D)

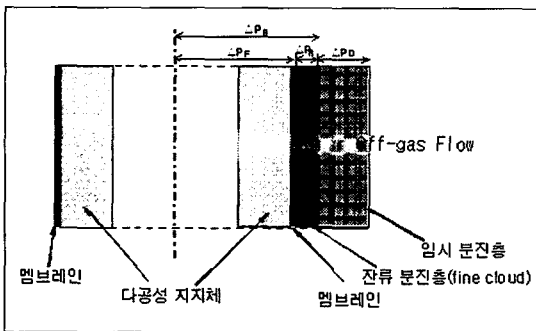


Fig. 6 The cross section of the element

따라서 각 채널 별로 시간 차이를 두고 펄스를 입력하는 것이 입구에서의 역류량을 줄이고 초기 탈진 성능을 높이는 방식으로 판단된다.

나. 실증실험 분석결과

1) 압력손실(Pressure Drop)

세라믹 필터의 압력손실은 필터자체에 의한 손실 (ΔP_{filter}), 분진 잔류층에 의한 손실($\Delta P_{residual}$), 분진 Cake에 의한 손실(ΔP_{cake})으로 나누어 진다. 이 중에서 ΔP_f 와 ΔP_c 을 합하여 기저압력차($\Delta P_{baseline}$)라 부른다. $\Delta P_{baseline}$ 는 집진이 수행되면서 점점 증가하게 되고 시간이 지남에 따라 필터의 기공에 미세 분진이 계속 쌓여 잔류층이 점점 두꺼워 진다. 역세정에 의하여 케이크 층이 떨어져 나가면 필터의 성능이 되살아나 연속적으로 운전이 가능해지지만 오랜시간 사용하면 $\Delta P_{baseline}$ 이 너무 커서 작동이 힘들게 되고 잔류압력손실이 계속 증가하여 투과율이 계속 감소하

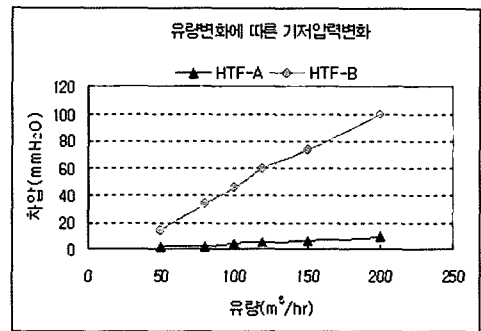


Fig. 7 Base line pressure drop of HTF-A, B

게 되어 필터의 성능이 떨어지게 된다. 따라서 운전 초기에 기저압력차를 측정하고 운전중 분진에 의해 발생하는 잔류압력손실을 모니터링 함으로써 필터의 수명을 예측할 수 있다.

고온필터를 장착한 후 실험전 필터의 기저압력차를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 본 실험에서는 유량변화에 따른 기저압력 변화를 실험하고자 하였으며, 운전유량이 평균 150m³/h일때 발생하는 필터 기저차압은 신규필터(HTF-B, Schumacher사)의 경우 75mmH₂O 임을 알 수 있었으며, 기존필터(HTF-A, cerafil사)의 경우 20mmH₂O 임을 알 수 있었다. 따라서 운전 중 잔류층에 의한 압력변화와 역세정후의 압력변화를 측정하고 운전초기의 $\Delta P_{baseline}$ 과의 차이를 확인하고자 하였다.

2) 역세정 운전모드 분석결과

본 실험에서 사용된 SiC 재질의 필터는 멤브레인 층이 있어 내구성과 여과효율이 우수하고 상대적으

로 높은 여과속도의 적용이 가능하여 적은 수의 여과재만을 필요로 하였다. 기존필터에 적용되었던 분산식(Dispersion mode) 역세정 방법은 일정한 간격으로 상온(常溫)의 압축공기를 쉬지 않고 분사하는 방식이다. 따라서 차압이 낮을 때에도 계속 필터에 충격을 주기 때문에 필터의 열적, 기계적 스트레스가 누적될 것으로 판단된다. 분산식 역세정 방법에서의 공기 분사횟수는 cycle time 12초와 각각의 blow pipe 5개 line을 계산하면 1분마다 필터 하나에 압축공기가 분사되며, 시간당 필터 한 개에 분사되는 횟수는 60회 이다. 반면 집합식(Collective mode) 역세정 방법은 차압이 안정적일 경우 역세정을 하지 않고 일정차압에 도달할 경우 blow pipe 5개 line에 12초 간격으로 분사하는 방법으로 역세정 횟수가 현저하게 줄어들어 상온공기와 배기체 온도차에 의한 필터의 열충격과 역세정 압력에 의한 기계적 충격을 최소화 할 수 있는 것으로 판단된다.

본 실험에서는 집합식의 경우 한시간 동안 역세정을 하지 않고 분진층이 자연스럽게 형성되도록 하였으며, 설정차압에 도달하게 될 때 5분동안 역세정을 해주기 때문에 필터당 압축공기 분사횟수는 필터 한 개당 5회 정도로 실시하였다. 이는 분산식 역세정 방법보다 12배 정도 압축공기에 의한 필터 스트레스를 감소시키는 결과라 할 수 있을 것이다. Fig. 8에 보듯이 집합식으로 운전할 경우에 고온필터 시스템은 안정된 차압을 유지하는데 아무런 문제가 발생하지 않았다.

IV. 결론

본 연구는 고온 세라믹 필터에 형성된 먼지 층(Dust cake)을 제거하고 안정된 차압을 형성하여 고온가스 집진시스템을 원활하게 운전하는데 목적이 있다.

실험결과 고온필터 내의 탈진성능에 미치는 영향 인자는 Pulse 압력과 Pulse 유지시간, 압축공기 분사 방식인 것으로 나타났다. 이는 필터 여과재에 형성된 먼지층 제거효율에 영향을 미칠 뿐만 아니라 고온필터 내부의 차압등 운전인자 및 필터 수명에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이와 관련된 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 압축공기 분사압력을 최소한 3bar 이상으로 운전할 경우 필터 여과재 중앙부까지의 유동전달의 효과가 있는 것으로 나타났다.

둘째, 2차원 분석결과 필터 여과재 길이 별 유동특성은 필터 여과재 1000mm에서는 약 40msec 이후부터 분사된 유동이 일정하게 유지되며, 1500mm 인 경우는 약 90msec 이후 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 3차원 분석모델에서는 Pulse 유지시간은 10msec에서 가장 멀리 압축공기가 필터 여과재에 전달되었으며, 40msec 이상에서는 유동이 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 Pulse 유지시간은 40msec 가 가장 적당한 것으로 판단된다.

셋째, 필터 여과재에 압축 공기를 분사하는 방식은 전체 채널을 동시에 분사하는 방식보다는 1개 채

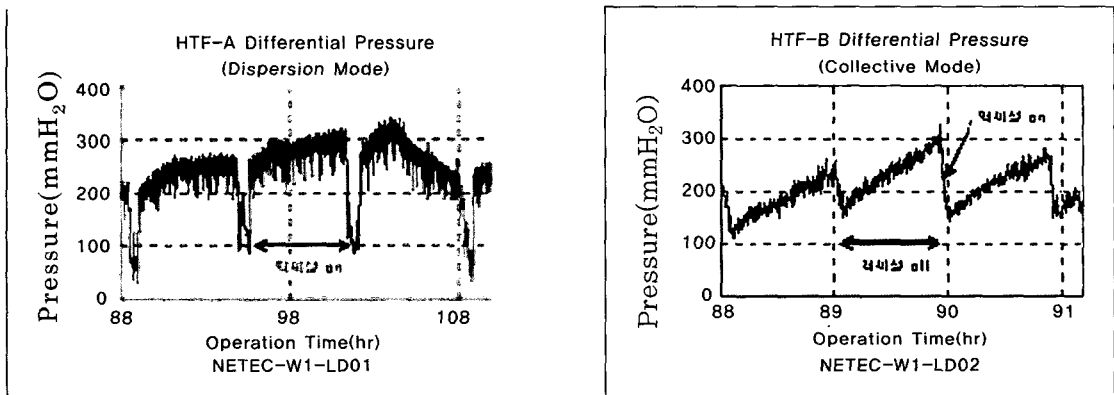


Fig. 8 The relative effect of dispersion mode and collective mode

널에 분사하는 방식이 고온필터 입구에서의 역류량이 현저하게 줄어들기 때문에 고온필터 전단의 내부 압력에 미치는 영향이 작을 것으로 판단된다. 또한 전체 채널 동시 분사하는 방식보다 1 채널만 분사할 경우 다른 채널의 노즐에서 분사되는 펄스압력 간섭이 없는 것으로 판단되며, 초기 Pulse Jet 발달 속도가 전체 펄스 채널을 가동한 경우에 비해 빠른 것으로 나타났다. 따라서 각 채널 별로 시간 차이를 두고 펄스를 입력하는 것이 입구에서의 역류량을 줄이고 초기 탈진성능을 높이는 방식으로 판단된다.

넷째, 역세정 모드의 경우 일정한 차압에 도달할 때까지 역세정을 하지 않고 분진층이 자연스럽게 형성되도록 유도하여 분진층에 의한 여과효과를 높이고, 역세정 횟수를 감소시킴으로써 필터의 열충격 및 기계적 충격을 최소화 할 수 있는 집합식(Collective mode) 역세정방법이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 중·저준위 방사성 폐기물 유리화 기술개발(I), 최종보고서, 한전 원자력환경기술원, 2000. 6
2. J. H. Chung, S. B. Seo, A numerical analysis of pulse-jet cleaning characteristics for ceramic filter system design, Eng., Vol. 12, No. 3, pp 197206(2003)
3. Y. G., Seo, J. H., Choi, A Study on optimization of a particulate removal facility with ceramic filter, Chem. Eng., Vol. 37, No. 5, pp. 807813(1999)
4. J. D., Cheng, J. B., Lee, C. Y., Kim, A Study on Ash Size and its Distribution on Cleaning of Ceramic Candle Filter, J. of KSME, Vol. 20, No. 5, pp. 16391648(1996)
5. S. J., Park, 고온가스 집진시스템 상용화 연구동향, ETIS, Vol. 21, pp. 5973