

고온고압 세라믹 여과재 탈진 과정의 유동 해석

Analysis for the Pulse-Jet Cleaning Flow of a Hot Gas Ceramic-Filter Element

°박 인 옥¹⁾, 류 제 형¹⁾, 최 도 형²⁾

I. W. Park, J. H. Ryu, D. H. Choi

An axisymmetric Navier-Stokes procedure has been developed to analyze the pulse jet flow in a ceramic filter unit for the dust dislodging process. Using Baldwin-Lomax turbulence model as a closure relationship, the SIAF(Scalar Implicit Approximate Factorization) algorithm together with the δ^k -Correction iterative time marching scheme is adopted to solve the unsteady compressible Navier-Stokes equations.

After some validation tests, the code has been applied to solve the pulse jet flow and examine the effects of geometry and reservoir pressure condition on the pressure level inside the filter unit. To avoid dealing with the uncertainty of such factors as the cohesion of the collected dust and the adhesion of the dust to the medium and also to simplify the analysis, the filter wall is assumed to be impermeable. The results for various test cases are presented.

1. 서 론

산업화와 함께 전세계적으로 환경오염이 심화되면서 이에 대한 인식과 함께 그에 따른 규제가 강화되고 있다. 특히 각종 소각로 및 산업체의 고온 배기 가스에 포함된 오염 물질에 의한 대기오염은 그 정도가 날로 심각해지고 있는 실정이다. 이러한 대기오염 물질들을 효과적으로 제어하여 그 배출량을 규제치 이하로 낮추기 위한 장치 중에서 세라믹 여과재를 이용한 여과 집진 기술은 기계적, 화학적인 내구성(mechanical and chemical durability)을 가지며[1, 2], 기존의 산업용 여과 집진기에 비해 여과속도가 최대 10배 정도까지 빠르고 고온에서 먼지를 제거하기 때문에 별도의 냉각 설비가 필요하지 않아 소형의 설비로 다량의 배기가스를 처리할 수 있고[3], 고온고압의 청정가스를 건조공정, 난방 등에 이용할 수 있는 등의 장점이 있다.

세라믹 여과재 집진장치를 이용한 여과과정은 크게 청정 및 탈진 과정으로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 청정과정을 통해 filter 벽에 포집된 먼지층을 제거하는 탈진 과정을 다루고자 한다. 세라믹 여과재에 포집된 먼지층의 제거는 주로 고압의 pulse jet을 분사시켜서 이루어지게 되며 그 개략도는 Fig. 1 과 같다.

Pulse jet을 이용한 탈진 과정의 연구는 필터 형상 및 성질의 다양함 외에도 포집된 먼지의 응집력, 먼지가 세라믹 여과재에 부착된 정도에 따라 시간 및 공간에 따라 필터의 투과율(permeability)이 달라지기 때문에 주로 실험에 의존해 왔다[4-6]. Christ등[7]은 하나의 필터 unit에 대하여 축대칭 유동장을 가정하고 상업용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 아음속 영역에서 유동 해석을 수행하고 또한 자신들의 실험 결과와 비교하여 낮은 탈진 강도(reservoir pressure)에서 비교적 정확한 결과를 얻었다. 본 연구에서는 다수의 원통형 filter를 통해 청정과정 이 일어나는 유동장을 단순화시켜 Fig. 1 에서와 같이 1개의 unit에 대한 축대칭 유동장으로 가정하여 기존의 대부분의 연구에서 부족했던 전체적인 유동장에 대한 정보와 탈진효율을 높이기 위해 사용되는 orifice 등과 같은 기하학적인 요소변화에 따른 결과를 고찰하였다.

2. 지배방정식 및 수치해법

1) 한국과학기술원 기계공학과 (305-701, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, Tel : 042-869-3058)

2) 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : 042-869-3018)

일반좌표계에서 보존형으로 표기된 축대칭 비정상 압축성유동에 대한 연속, Navier-Stokes, 그리고 에너지 방정식[8]을 무차원화하여 사용하였다. 수치해법으로는 Beam-Warming 방법의 근사 인수화된 block 행렬 체계를 유사변환(similarity transformation)으로 대각화 하여 연계된 방정식을 독립화시키고 각각의 scalar tridiagonal 행렬을 역변환하여 해를 구하는 SIAF(Scalar Implicit Approximate Factorization) 방법[9]을 적용하였다. 양성향의 공간차분으로는 Harten-Yee의 Flux Difference Splitting계열의 2차의 Upwind-TVD기법[10]을 적용한 유한체적법, 시간적분법으로는 delta 형의 내재적 기법이 가지는 낮은 시간정확도[9]를 해결하기 위해 Matsuno가 제시한 δ^k -Correction 방법[11]을 도입하였으며 Baldwin-Lomax 난류모델[12]을 사용하였다.

3. 계산 결과 및 토의

내부유동 계산에서 중요하게 다루어지는 convergent 부분이 45° 경사이고 divergent 부분이 15° 경사인 축대칭 JPL 노즐 유동을 통해 code를 검증하였다. 기준 물성치인 stagnation 압력 및 온도는 각각 10atm 과 573K 로 주어 층류와 난류 두 경우를 모두 계산하였는데 Cuffel 등[13]의 실험결과와 비교하여(Fig. 2) 잘 일치함을 볼 수 있다.

1차의 시간정확도를 갖는 SIAF 수치해법의 단점을 보완하기 위해 δ^k -C 방법을 적용하였으며 충격파관 유동 해석을 수행해 그 효과를 고찰하였다. Euler 해석이며 $\tau = 0.25$ 인 때의 결과를 Fig. 3에 해석해와 비교하였다. SIAF 방법에 의한 해는 해석해와 차이를 보이거나 δ^k -C 해법의 해는 잘 일치함을 볼 수 있다.

세라믹 필터의 탈진과정 유동해석을 위하여 Fig. 4에 보인 대로 2개의 block으로 이루어진 격자계를 구성하였다. 첫 번째 block은 reservoir 및 필터 unit을 포함하고 2번째 block은 jet nozzle로부터 위쪽 대칭면까지를 포함하게 된다. 벽면의 no-slip 조건, 대칭축 및 바깥 경계의 대칭조건 등의 경계조건을 사용하며 또 초기조건은 $x=0$ 인 위치에 있는 valve를 사이에 두고 왼쪽은 고압 저장탱크(reservoir)로 압력이 13(또는 20)atm이며 오른쪽은 필터쪽으로 10atm이라고 하였고, 온도는 양쪽 모두 500K, 밀도는 압력에 의해서 결정하고 속도는 0이라고 가정하였다. Table 1은 계산에서 사용된 기준값들과 필터의 dimension등을 나타낸 것이다.

Temperature	500 K
Pressure	10 atm
density	7.06 m ³ /kg
Speed of sound	448.22 m/s
Dynamic viscosity	2.67 × 10 ⁻⁵ kg/m · s
Reynolds number	4.74 × 10 ⁶
Inner diameter	0.04 m
Filter length	1 m

Table 1 Reference properties and filter dimensions

	Orifice 목의 깊이	Orifice 모양	Jet의 위치(nozzle 에서부터)	Reservoir pressure
Case A	0.25	대칭 모양	0.5	13 atm
Case B	0.25	목이 앞부분에 위치	0.5	13 atm
Case C	0.25	대칭 모양	0.5	20 atm
Case D	0.25	대칭 모양	2.0	13 atm
Case E	0.125	대칭 모양	0.5	13 atm
Case F	0.3	대칭 모양	0.5	13 atm

Table 2 Various test cases

2개의 block에 각각 115×28 과 40×23의 격자를 분포시켜(Fig. 5 참조) time step을 0.25×10^{-3} 으로 하여 valve가 열리고 무차원화된 시간 τ 가 750이 될 때까지의 유동을 관찰하였는데 유동 해석을 수행한 대부분의 경우 이 시간내에서 준 정상상태에 이르게 된다. 탈진효율을 향상시키기 위해서는 필터 내부의 압력을 빨리 높일 수 있어야 하는데 여러 인자가 이에 미치는 영향을 보기 위해 Table 2에서와 같이 인자를 바꾸어 가며 계산을 수행하였다.

먼저 Case A를 보면 초기조건으로 준 압력의 차이에 의해 압력파가 필터쪽으로 이동하게 되며 유동이 발달하게 된다. Jet 노즐에서 발달한 유동이 외부로 나오게 되면 유동이 점차 확산되게 되며 이 유동이 orifice쪽으로 진행하면서 점차 가속되는 것을 볼 수 있다. 시간이 조금 더 경과하면 중심축에서의 속도는 조금 줄어들고 운동량이 적은 벽쪽에는 유동의 반사가 이루어져서 중심축의 유동과 반대 방향의 유동이 발달하는 것이 관찰되며, 시간이 어느 정도 흐른 뒤에는 유동장의 변화가 거의 없어진다. 이러한 현상은 정성적으로는 다른 경우의 결과에서도 비슷하게 나타나는데 자세히 관찰해야 될 양은 탈진효율에 영향을 주는 필터내에서의 압력 크기와 필터 내로 유입되는 유량이기 때문에 이 값을 Figs. 7-8에 비교하였다.

Fig. 7에서는 여러 경우에 대해 필터 내로 유입되는 총 유량을 시간에 따라 나타내었다. Case B의 경우에는 orifice의 모양이 비대칭인 경우로써 목이 앞쪽 부근에 위치하게 된다. 필터내로 유입되는 유량이 Case A보다 증가한 것을 알 수 있는데(Fig. 7-(a)) 이는 초기에 유동이 유입될 때에는 orifice의 기울기가 크므로 보다 많은 양이 유입되고 시간이 좀 더 흐른 뒤에 반대쪽으로 유동이 발달하게 되면 Case A보다 목 이후의 기울기가 작으므로 반사 유동을 덜 가속시키는 효과가 있기 때문으로 생각된다. Case C의 경우는 reservoir의 압력을 높여 20 atm으로 준 경우인데 더 큰 압력차로 인해 속도도 빨라지고 필터내로 유입되는 유량도 그만큼 더 커지게 되며 따라서 압력 상승이 빨리 이루어지게 된다(Fig. 7-(b)). Case D의 경우에는 orifice와 jet 노즐간의 간격이 Case A보다 큰 경우로 유동이 좀 더 넓게 확산되기는 하지만 진행속도도 느리고 중심부근의 속도도 Case A보다 작아진다. 따라서 유입되는 유량이 Case A보다 좀 더 작아진다(Fig. 7-(c)). Case E 와 Case F의 경우는 orifice의 목(throat)의 깊이를 바꾸어 가며 결과를 살펴본 것이다. Case E의 경우는 목의 깊이가 Case A보다 낮은 경우로 면적비가 작기 때문에 반사되는 유량을 잘 막지 못해 jet 출구의 유량도 줄어들게 되고 반사되는 유동이 그만큼 자유롭게 밖으로 나가게 되므로 필터내로 유입되는 유량과 압력은 작은 값을 갖게 된다(Fig. 7-(d)). 그러나 orifice목이 jet 에서 나오는 유량의 유입을 방해하지 않을 정도내에서 좁은 단면을 가지면 반사하는 유량을 막아 주어 그만큼 유입되는 유량과 압력을 최대한 높일 수 있다고 유추할 수 있다(Fig. 7-(e), Fig. 8). Fig. 8은 $r=750$ 때 중심축의 압력을 비교한 것인데 Fig. 7과 비교해 총 유량이 클수록 압력이 높은 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 초기에 많은 양의 공기가 필터 내부로 유입되고 시간이 경과해 유동의 반사가 이루어지면 소량의 공기만이 계속해서 필터 내부로 들어가게 된다. 또한 jet 노즐의 출구에서 나오는 유량은 점차 일정해지는데 반하여 필터쪽으로 유입되는 양은 진동하면서 차츰 일정한 값으로 되는 경향을 보이는데 이는 필터의 끝쪽 벽에서부터의 반사파의 영향에 기인하는 것으로 생각된다. 압력파가 오른쪽으로 진행하여 필터 끝의 압력이 올라가는 경우는 유입되는 유량이 증가하고 반대의 경우 유량이 감소하게 되며 시간이 흐름에 따라 이 영향이 적어지면 압력은 일정하게 상승하고 필터 내로 유입되는 유량은 거의 일정한 값을 갖는다.

4. 결론

비정상 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식의 해법을 개발하여 세라믹 필터 탈진 과정의 유동 해석을 수행하였다. 시간에 따른 유동장의 변화를 구하고 이에 따른 필터 내부에서의 압력변화를 관찰하였다. 필터 내부에서의 압력은 압력파의 반사로 인해 국부적으로는 진동하는 경향이 있지만 시간에 지남에 따라 이러한 경향이 감소하였으며 전체적으로 균일하게 증가하는 경향을 보인다. 속도장은 초기에만 변화를 보이고 일정 시간이 지나면 거의 변화를 보이지 않는 것으로 보이며 유동은 필터내부의 일정부분 이상 진행하지 않고 벽쪽에서는 유동의 반사가 일어난다. 필터 내 orifice의 형상이 탈진효율에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부의 선도기술개발사업의 일환으로 아주대학교의 위탁을 받아 수행하였으며 관

제자 여러분께 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

- [1] J. P. K. Seville, S. Ivatt and G. K. Burnard, *High Temperature Gas Cleaning*, MVM(1996), pp.3-25
- [2] Akira Ogawa and J. K. Beddow, " *Separation of Particles From Air and Gases :Volume I, II,*" 1984, CRC Press
- [3] 아주 대학교, "고온 고압 세라믹 여과재 집진 기술 개발 및 실용화," 환경부, 1997. 1.
- [4] R. Mai, M. Fronhofer and H. Leibold, *High Temperature Gas Cleaning*, MVM(1996), pp.193-206
- [5] C. M. Stephen, S. K. Grannell and J. P. K. Seville, *High Temperature Gas Cleaning*, MVM(1996), pp.207-218
- [6] S. Berbner and H. Umhauer, *High Temperature Gas Cleaning*, MVM(1996), pp.718- 727
- [7] A. Christ and U. Renz, *High Temperature Gas Cleaning*, MVM(1996), pp.728-739
- [8] K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, " *Computational Fluid Dynamics for Engineering,*" 1993, Engineering Education System
- [9] T. H. Pulliam and D. S. Chaussee, *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, 1981, pp.347-363
- [10] H. C. Yee, *NASA-TM101088*, Feb., 1989
- [11] Kenich Matsuno, *AIAA paper 89-1992-CP*
- [12] B. S. Baldwin and H. Lomax, *AIAA J.*, Vol. 22, No.7, July, 1984
- [13] R. F. Cuffel, L. H. Back and P. F. Massier, *AIAA J.*, Vol. 7, 1969, pp.1364-1365

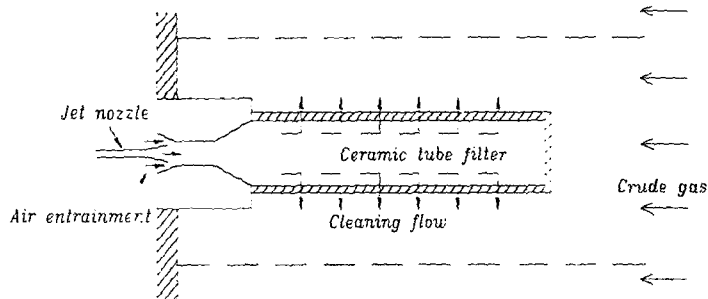
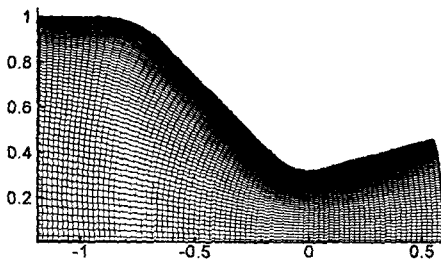
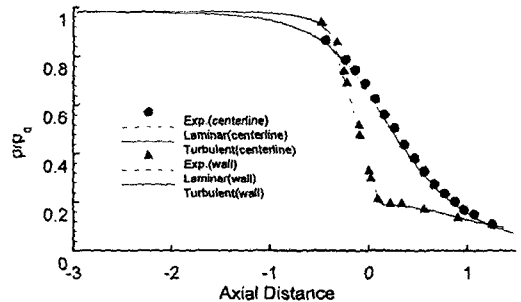


Fig. 1 Schematic of pulse jet cleaning flow

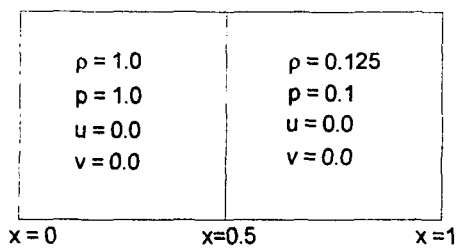


(a) Computational grid

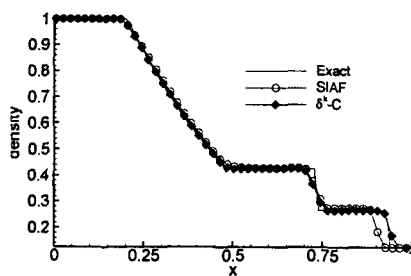


(b) Pressure distribution

Fig. 2 JPL nozzle flow



(a) Initial condition



(b) Density distribution

Fig. 3 Shock tube problem

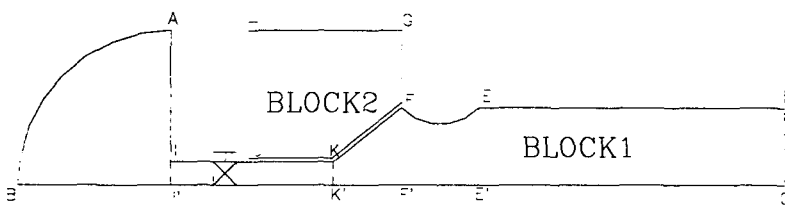
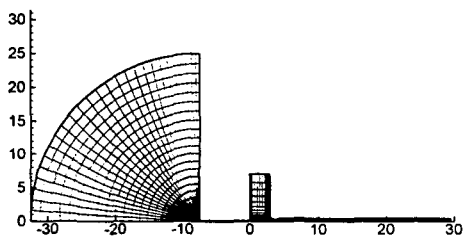
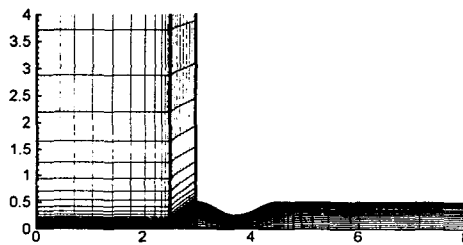


Fig. 4 Computational domain of pulse jet cleaning flow

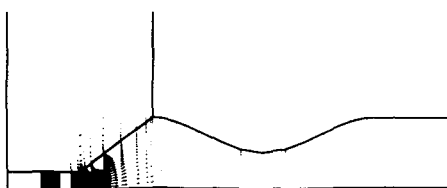


(a) Overview

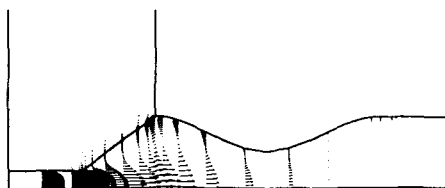


(b) Enlarged view

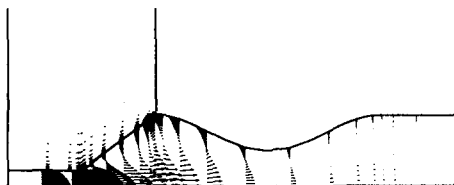
Fig. 5 Computational grid(Case A, C)



(a) $\tau = 5$

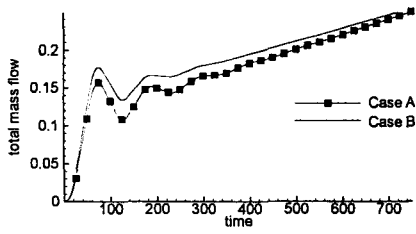


(b) $\tau = 20$

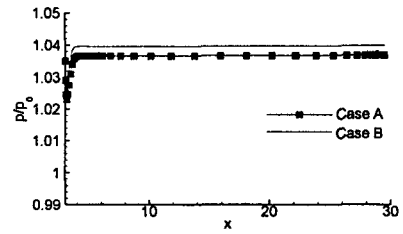


(c) $\tau = 300$

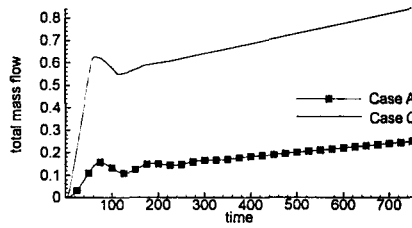
Fig. 6 Velocity vectors at inlet region for Case A at various instants



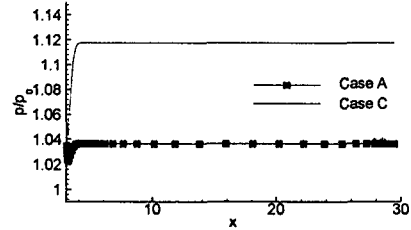
(a) Case A vs. Case B



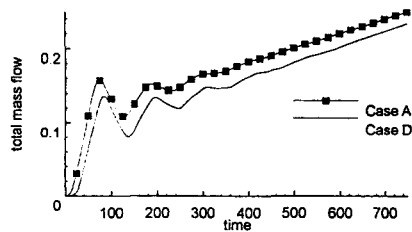
(a) Case A vs. Case B



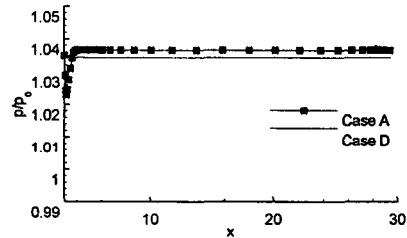
(b) Case A vs. Case C



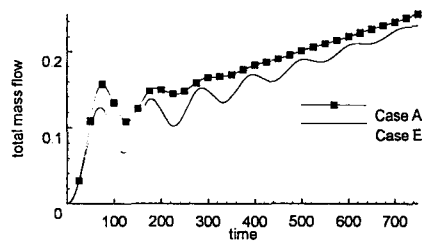
(b) Case A vs. Case C



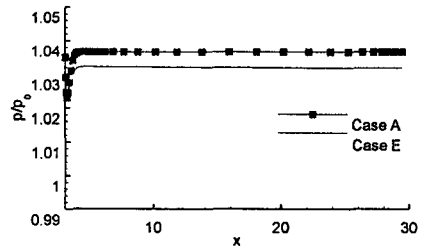
(c) Case A vs. Case D



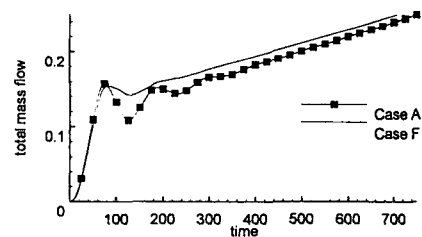
(c) Case A vs. Case D



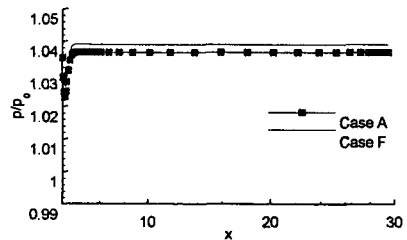
(d) Case A vs. Case E



(d) Case A vs. Case E



(e) Case A vs. Case F



(e) Case A vs. Case F

Fig.7 Comparison of entrained total mass flow rate

Fig. 8 Comparison of centerline pressure at $\tau = 750$