

접선유입방식 여과포 집진장치에서 내통이 유동장 및 입자거동에 미치는 영향

박석주[†] · 최호경 · 김상도 · 박영옥

한국에너지기술연구원 집진기술연구센터
(2001년 4월 20일 접수, 2001년 5월 26일 채택)

Effect of an Inner Tube on the Flow Field and Particle Behavior inside a Bag Filter System with a Tangential Inlet

Seok Joo Park[†], Ho Kyung Choi, Sang Do Kim and Young Ok Park

Particle Technology Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
(Received 20 April 2001; accepted 26 May 2001)

요 약

내부에 내통을 설치한 새로운 접선유입 순환방식의 여과포 집진장치에서 여과포 집진장치 내부로 유입된 입자들의 여과포 표면으로의 입자부하(particle loading)를 최소화할 수 있는 최적의 내통 형상을 제안하기 위하여 수치모사(computational simulation)를 이용한 이론적 해석을 수행하였다. 또한 집진용기 바닥면에 침적되어 있는 입자들의 재유입(reentrainment)을 최소화할 수 있는 내통 형상도 제안하였다. 수치해석 결과, 내통은 유입입자들의 집진용기 내벽에서 여과포로의 직접 전달을 차단하기 때문에 여과포 표면으로의 입자부하량을 저감시켰다. 여과포 상부 주위에 내통이 설치되는 경우보다는 하부 주위에 설치되는 경우 여과포로의 입자부하량이 감소하였다. 그리고 집진용기 바닥면에 침적되어 있는 입자들의 재유입은 여과포 상부 주위에 내통이 설치된 경우는 내통이 없는 경우에 비해 큰 차이가 없었지만, 여과포 하부 주위에 내통이 설치된 경우는 침적입자들의 재유입량이 크게 감소하였다.

Abstract – A new bag filter system has been developed with tangential inlet and an inner tube. Computational simulation was performed to suggest an optimum shape of the inner tube which might decrease the loading onto bag filter surface of the particles entering a filter vessel and the reentrainment of particles from the bottom wall of the vessel. According to the computational results, the particle loading onto the bag filter was reduced by obstructing particles moving directly from the near wall of the vessel to bag filters when an inner tube was located around the bag filters. The particle loading was lower when an inner tube covered around the lower part of the bag filters from the turbulent flow recirculating near the vessel wall as the upper part of filters was not covered. Also, the reentrainment of particles from the bottom wall decreased with an inner tube covering around the lower part of filters.

Key words: Particle Loading, Bag Filter, Tangential Flow, Inner Tube, Reentrainment

1. 서 론

여과포 집진장치는 연소 및 폐기물 소각공정 등에서 배출되는 입자상 오염물질을 제거 처리하는데 효과적인 장치로써 현재 산업체 공정에 널리 사용되고 있다. 전기집진기나 싸이클론 등의 다른 집진장치에 비하여 집진효율이 높은 장점이 있는 반면, 여과포에 부착된 입자층에 의한 과도한 압력손실로 인한 동력시스템 운전비, 입자층 제거를 위한 주기적인 탈진 공정 운전비, 여과포의 교체 등으로 인한 유지·보수비 등의 경제적 부담이 큰 단점이 있다[1, 2]. 여과포 표면에 도달하는 입자의 농도를 낮추거나 균일하게 유지시킬 경우, 부착된 입자층 두께의 성장

으로 인한 압력손실의 증가율을 줄일 수 있고, 이로 인하여 탈진 주기 또한 감소시킬 수 있으며, 탈진 조작의 저감에 의한 여과포의 수명 증대로 인하여 여과포의 교체 시기를 연장시킬 수 있으므로 여과포 집진장치의 운전 및 유지 보수비의 저감을 이룰 수 있다. 여과포 표면상의 입자의 농도 분포를 균일하게 하고 입자 부하량을 저감시키기 위하여 Gregg과 Davies[3]는 여과포 집진장치의 유입부에 분산판을 설치하였고, 여[4]는 유입관을 집진용기에 접선방향으로 유입시킨 하부유입식 원심 여과집진장치의 개발 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 여과포로의 입자부하량(particle loading)을 줄이기 위하여 내통(inner tube)을 설치한 새로운 형상의 접선유입방식의 여과포 집진장치를 개발하였다. 오염입자를 함유한 기체유동은 집진용기의 중간부분에 위치한 접선 유입관을 통하여 유입된다. 유입된

[†]E-mail: sjpark@kier.re.kr

입자들 중 일부는 원심유동과 난류확산에 의하여 집진용기 내벽과 내통 벽면에 부착된 후 분진층의 자중에 의하여 집진용기 하부로 자연 침강된다. 나머지 입자들은 여과포로 이동되어 집진되고, 여과포 표면에 집진된 분진층은 역세(back pulse jet)를 이용한 탈진공정에 의하여 여과포 표면으로부터 제거된다. 제거된 분진층의 입자들은 중력에 의하여 용기 바닥으로 침적된 후 바닥면에 설치된 스크래퍼(scraper)에 의하여 분진 저장조로 분리 처리된다. 접선유입방식의 여과집진장치 내부에서의 내통 형상에 따른 유체유동 및 입자거동의 특성 변화를 해석하기 위하여 수치모사(computational simulation)를 수행하였다. 그 결과, 여과포로의 입자부하량과 집진용기 하부의 침적 입자의 재유입(reentrainment)을 최소화 할 수 있는 최적의 내통 형상을 제안하였다.

2. 이론적 배경

집진장치의 요소 명칭과 크기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 집진용기와 4개의 여과포 그리고 내통으로 구성되어 있다. 본 수치해석 연구에서는 입자와 기체 유동이 접선 유입관을 통하여 용기 내로 유입된 후, 용기 내의 유동장을 따라 이동하면서 일부 입자들은 용기 내벽과 내통 벽면에 부착되고 나머지 입자들은 모두 여과포 표면으로 이동하여 집

진된다고 가정하였다. 실제로는 일부의 입자들이 여과포 표면을 지나 여과포 내부 섬유 상에 부착되거나 여과포를 관통하여 빠져나가지만, 현재로는 수치해석상 여과포 내부 섬유 상에서의 입자의 집진 현상을 집진장치내의 유동 및 입자 거동 해석과 동시에 묘사하는 것은 아주 어렵다. 또한 집진된 입자층이 내부 유동에 미치는 영향은 수치해석의 단순화를 위하여 무시하였다.

집진장치내의 유체유동 및 입자거동을 해석하기 위하여 상용 전산 프로그램인 미국 Fluent사가 개발한 FLUENT version 5를 이용하였다[5]. Fig. 1에서와 같이 내통을 6 조각으로 나누어 각각을 내벽인 경우 혹은 내부 계산 면인(즉, 내벽이 아닌) 경우로 설정하여 내통의 길이와 위치에 따른 집진장치내의 유동장 및 입자거동의 변화를 수치 해석하였다. 입자상 물질을 함유하고 있는 3차원 난류 비압축성 정상 유동의 지배 방정식은 유체의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 난류운동에너지방정식, 난류소산율방정식과 입자의 운동과 궤적을 나타내는 Lagrangian 입자궤적추적모델(particle trajectory tracking model) 방정식으로 서로 결합(coupling)되어 있으며, 이 식들은 동시에 계산되어야 한다. 유동장 해석 시 유입구의 레이놀즈수($Re = \rho u L / \mu$)를 기준으로 판단해 볼 때 난류유동으로 간주되고, 내부에서 강한 선회유동이 발생하므로 높은 전단변형률을 고려한 RNG k- ϵ 난류 모델[6]을 채택하였다. 장치 내부의 유동장 및 입자궤적을 계산하기 위한 계산 격자는 기하학적 구조와 격자 제작용 소프트웨어인 GAMBIT 1을 이용하여 비정렬 격자인 사면체, 육면체, 피라미드형, 프리즘형 격자들로 이루어진 복잡한 여과포 집진장치 내부 격자 구조를 만들었다[7].

2-1. 기본 지배방정식과 난류모델

정상상태 비압축성 난류유동을 해석하기 위한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다[8].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

여기서 u_i 는 유체의 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, p 는 평균 정압력, ν 는 유체의 층류 동점성계수, u'_i 는 유체의 난류 섭동 성분을 의미한다. 보시네스크 가설(Bossinesque eddy-viscosity hypothesis)에 의하여 레이놀즈 응력과 난류 동점성계수와의 관계는 다음과 같이 표현된다[9].

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (4)$$

여기서 k 는 난류운동에너지, ϵ 는 난류소산율, δ_{ij} 는 Kronecker delta를 의미한다.

표준 난류모델에 비하여 소용돌이나 회전유동을 잘 해석하고 계산 시간도 적게 소요되는 이점이 있는 RNG 난류모델의 난류운동에너지 및 난류소산율 전달방정식은 다음과 같다[10].

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

모델에서 사용되어진 상수들은 $C_\mu = 0.085$, $C_{\epsilon 2} = 1.68$, $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 0.7179$ 이다. 계수 $C_{\epsilon 1}$ 은 난류의 시간 크기(time scale)와 평균 변형률(mean-strain rate)의 비인 η 의 함수로 표현된다.

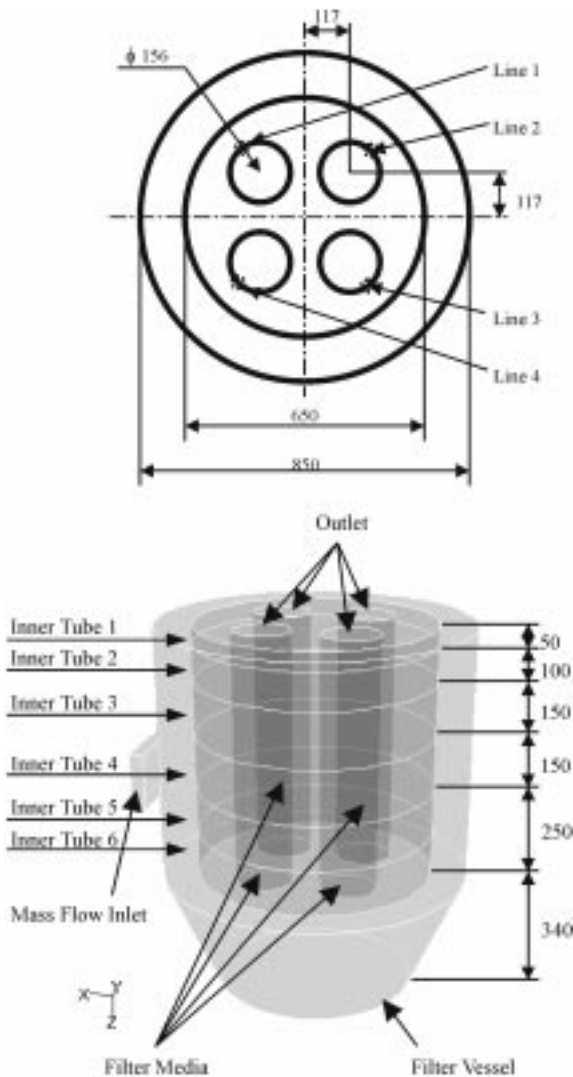


Fig. 1. Geometry of a bag filter system with a tangential inlet and an inner tube.

$$C_{e1} = 1.42 - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad (8)$$

여기서 $\eta_0=4.38$ 이고 $\beta=0.015$ 이며, S 는 아래와 같이 정의된 평균 변형률 텐서 계수를 의미한다.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (9)$$

$$S_{ij} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right] \quad (10)$$

2-2. 입자궤적 추적방법

입자궤적은 유동해석이 완전히 수렴된 후 형성된 유동장과 결합시켜 다시 유동장이 수렴될 때까지 함께 계산된다. 각 입자의 궤적은 유체의 저항과 중력을 고려한 입자운동방정식을 시간에 대해 적분하는 Lagrangian 방법을 이용하여 계산한다. 직교 좌표계인 경우 x 성분의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_p - u) + g_x(1 - \rho/\rho_p) + F_x \quad (11)$$

여기서 $F_D(u_p - u)$ 는 단위 입자질량에 작용하는 유체의 저항력을 의미하며, F_D 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \quad (12)$$

여기서 u 는 유체 속도, u_p 는 입자의 속도, ρ_p 는 입자의 밀도, d_p 는 입자 직경을 의미한다. 입자와 유체간의 상대속도의 함수로 정의되는 상대 레이놀즈수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (13)$$

저항계수(drag coefficient) C_D 는 다음과 같이 정의되며,

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (14)$$

계수 a_1, a_2, a_3 는 Morsi와 Alexander[11]의 반실험식으로부터 주어지는 값이다. 크기가 작은 입자에 작용하는 난류 섭동에 의한 입자의 난류 확산 거동을 고려하기 위하여 통계적으로 결정되는 난류속도장을 이용하여 입자의 운동방정식을 계산하였다.

2-3. 경계조건

유입구를 통하여 질량유량 0.05 kg/s의 공기가 단면적이 (150 mm×36.7 mm)인 유입면에 수직하게 유입되므로 유입구에서의 평균유속은 7.5 m/s이다. 총 여과면적이 1.45 m²이므로 여과포 표면에서의 평균 면속도는 1.7 m/min이다. 여과포 출구에서는 출구 압력 경계조건을 사용하였다. 벽면에서의 난류 방정식의 경계조건은 평형벽법칙(equilibrium law of the wall)을 적용하였고, 유입구에서의 난류 강도는 1%, 기준대표길이는 100 mm로 지정하였다. 모든 벽면에서는 유체는 정지조건(no-slip condition), 입자는 부착(trap)조건을 적용하였고, 벽면에 부착되지 못한 입자들은 모두 여과포 표면에서 부착된다고 가정하였다. 집진용기 내에서의 입자거동은 직경이 1 μm이고 밀도가 1,550 kg/m³인 입자에 대하여 계산하였다.

2-4. 다공성 매질 조건

Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 700 mm, 직경 156 mm인 4분의 원통

형 여과포가 집진용기의 중앙축을 기준으로 대칭으로 위치하고 있다. FLUENT 5에서는 유동장을 가로질러 존재하는 다공성 매질은 표준 유체유동 방정식의 운동량 원천항(source term)에서 고려되도록 모델링되어 있다. 원천항은 아래와 같이 점성에 의한 손실항과 관성에 의한 손실항의 합으로 표현된다.

$$S_i = D_{ij}\mu u_j + C_{ij}\frac{1}{2}\rho|u|u_j \quad (15)$$

여기서 D_{ij} 와 C_{ij} 는 각각 점성항과 관성항의 방향성 메트릭스를 의미하고, 균일 다공성 매질인 경우는 방향에 무관하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha}u_i + C_2\frac{1}{2}\rho|u|u_i \quad (16)$$

여기서 α 는 공극률(permeability)이고, C_2 는 관성저항계수이다.

원천항은 다른 처리 방법으로써 유체속도의 자승법(power law)에 의하여 다음과 같이 표현될 수도 있다.

$$S_i = C_0[u]^{(C_1-1)}u_i \quad (17)$$

여기서 C_0 와 C_1 은 다공성 매질의 양단에 걸리는 면속도에 대한 압력 손실 특성 곡선으로부터 경험적으로 결정된다. 본 연구에서 사용되는 여과포의 면속도-압력손실 특성 실험값으로부터 $C_0=600,000$ 이고 $C_1=1$ 이다.

3. 수치해석 결과

3-1. 내통 유무에 따른 유동장 및 유입 입자의 거동 특성 비교

먼저 내통이 집진장치내의 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위하여 내통이 없는 경우와 있는 경우에 대한 계산을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 2는 내통이 없는 경우의 집진용기 내부의 평균유속(mean velocity), 상승속도(rising velocity), 난류운동에너지(turbulent kinetic energy), 난류점도(turbulent viscosity) 분포를 보여준다. 집진방향을 따라 유입구를 통하여 유입된 유체는 유로 단면적의 급격한 확대(sudden expansion)에 의하여 유속이 저감되면서, 집진용기 내벽을 따라 흐르는 선회유동으로 발전된다. 선회유동은 여과포들로 둘러싸인 영역을 제외한 나머지 영역에 걸쳐 집진용기의 중심축으로부터 반경방향으로 연속적인 속도분포의 변화를 가진다. 선회류의 일부는 용기 내벽을 따라 하강하고 나머지는 상승하면서 용기 전체 벽면을 따라 흐르는 원심 순환유동이 형성된다. 용기 벽면을 따라 흐르는 상승기류와 하강기류는 상하부 끝벽면(end-wall)에 의한 끝벽면 효과로 인하여 유동 방향이 역행하여 흐르게 된다. 그 결과, 상승속도 크기 분포에서 볼 수 있는 바와 같이, 집진용기 내부의 재순환류(recirculating flow)들로 이루어진 아주 복잡한 유동장이 형성된다. 그림에서 상승속도 분포가 나타나지 않은 공백(void) 부분은 하강속도 영역을 나타낸다. 여과포의 압력저항(pressure drag)에 의하여 유체유동은 여과포사이의 공간을 통하여 중심축을 따라 하강하는 기류를 형성한다. 이 하강기류는 여과포 표면으로부터 탈진된 입자들의 집진용기 바닥면으로의 이동을 원활하게 할 것이다. 집진장치내의 정압력 분포의 계산 결과, 여과포 양단과 내부를 제외한 대부분의 영역에서는 정압력의 차이가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 난류운동에너지 분포에 나타난 바와 같이, 1%의 난류강도를 가진 유체유동이 유입구를 지나 집진용기 내로 유입될 때, 유입구 벽면 경계층에서의 속도구배에 의하여 난류운동에너지가 증가하고, 유입관과 용기 벽면이 만나는 모서리 부분에서 큰 속도 차로 인하여 높은 난류운동에너지가 발생된다. 용기 내벽을 따라 일정 거리를 지난 후 난류소산에 의하여 난류운동에너

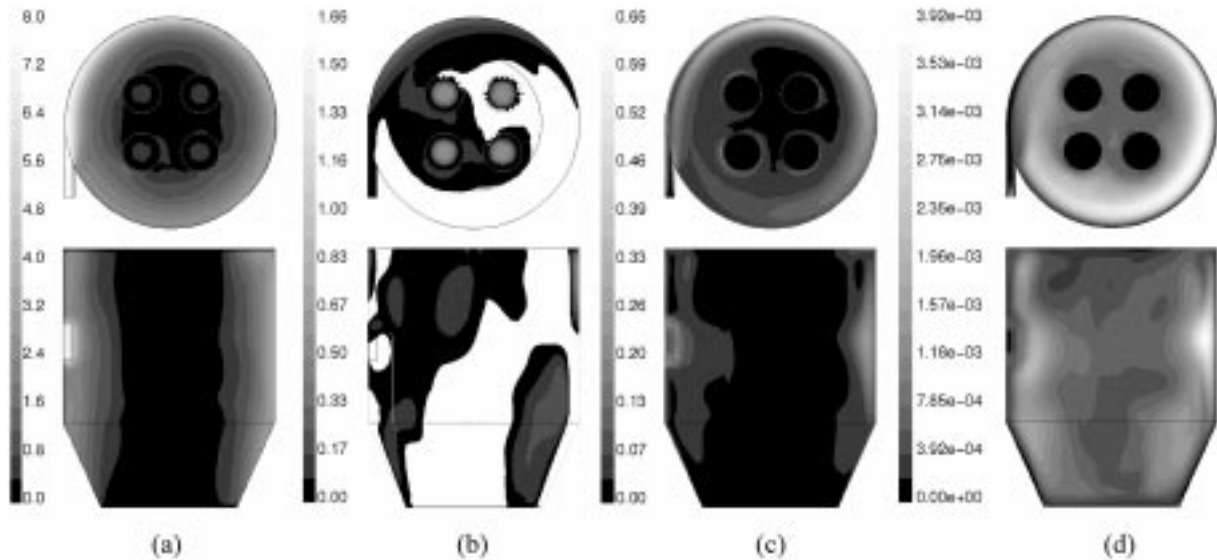


Fig. 2. Distributions of (a) mean velocity, (b) rising velocity, (c) turbulent kinetic energy, and (d) turbulent viscosity inside a filtration vessel without an inner tube.

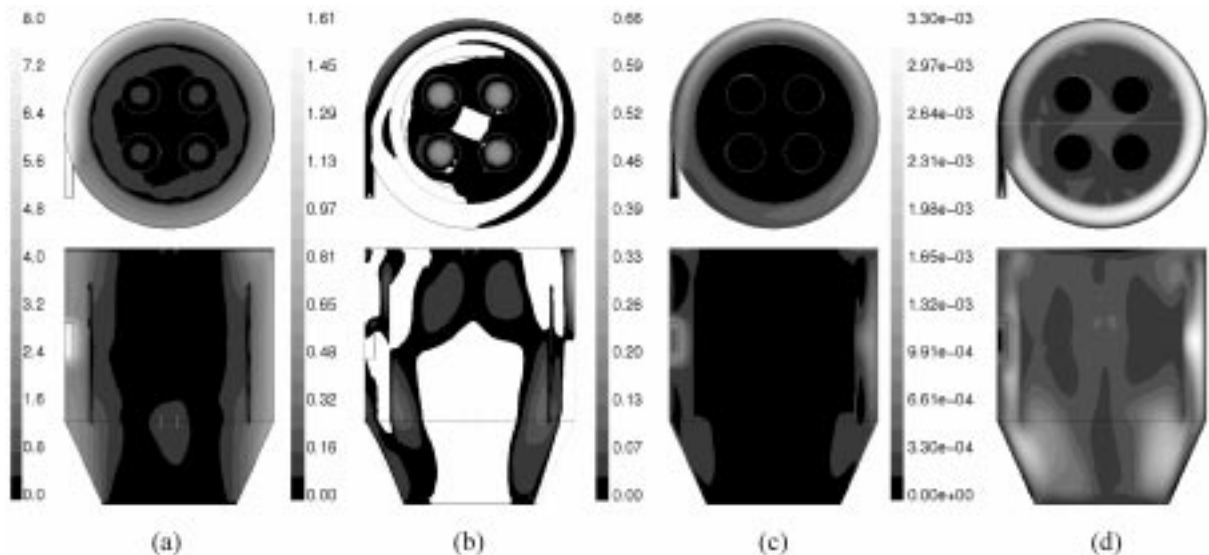


Fig. 3. Distributions of (a) mean velocity, (b) rising velocity, (c) turbulent kinetic energy, and (d) turbulent viscosity inside a filtration vessel with an 'Inner Tube 3456'.

지가 감소되고, 집진용기의 상하부에 이룰수록 감소하게 된다.

Fig. 1에서의 직경 650 mm의 내통 3, 4, 5, 6번으로 구성된 내통(이후 'Inner Tube 3456'으로 표기함)이 집진용기 내에 설치된 경우의 유동장 계산 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서도 Fig. 2에서와 마찬가지로, 유입관을 통하여 유입된 유동이 급속한 확대에 의하여 용기 내벽을 따라 유속이 확산 저장된다. 그러나 내통의 차단으로 인하여 내통 내부와 외부 사이에서 유속 분포의 단절이 존재함을 알 수 있다. 유입유동에 의하여 생성된 순회류의 상승 기류와 하강 기류가 끝벽면 효과에 의한 재순환 유동으로 인하여 집진용기 내부의 유동장은 아주 복잡한 분포를 이루고 있으며, 상승속도 분포에 나타난 바와 같이 내통이 없는 경우와 비교해 볼 때 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 집진용기의 중심축을 따르는 하강기류 분포가 내통이 없는 경우와는 달리 중심축을 기준으로 안정적인 대칭 구조를 이루고 있다. 내통이 존재하는 경우의 정압력분포의 계산 결과, 내통이 정압력분포에 미치는 영향은 아주 미미함을 알 수 있었다. 집진용기내의 난류운동에너지는 내통이 있는 경우 용

기 내벽과 내통 외벽을 따라 흐르는 순환류에 의하여 생성되지만, 내통이 없는 경우에 비하여 상대적으로 난류특성길이(turbulent length scale)가 작기 때문에 난류소산율이 증가하여 내통 벽면을 따르는 난류운동에너지의 감소율이 증가하는 것을 알 수 있다[12]. 그리고 순환류에 의하여 생성된 난류의 확산이 내통에 의하여 차단되기 때문에 내통 내부의 난류운동에너지와 난류점도가 내통이 없는 경우에 비하여 낮은 것을 알 수 있다.

내통 'Inner Tube 3456'이 여과포 표면에서의 평균유속, 난류운동에너지, 난류점도, 입자 농도 분포에 미치는 영향에 대하여 Fig. 4에서 살펴본다. Fig. 4에서의 'line 1, 2, 3, 4'의 위치는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 집진용기 중심축을 기준으로 여과포 표면의 최외곽 수직선을 의미한다. 'wo'는 내통이 없는 경우를, 'w'는 내통 'Inner Tube 3456'이 있는 경우를 의미한다. 'line 1, 2, 3, 4' 선상에서의 평균유속은 내통이 있는 경우가 내통이 없는 경우에 비하여 내통으로 차단된 영역에서 더 낮아진다. 이것은 내통으로 인한 유체의 대류 전달이 차단되기 때문이다.

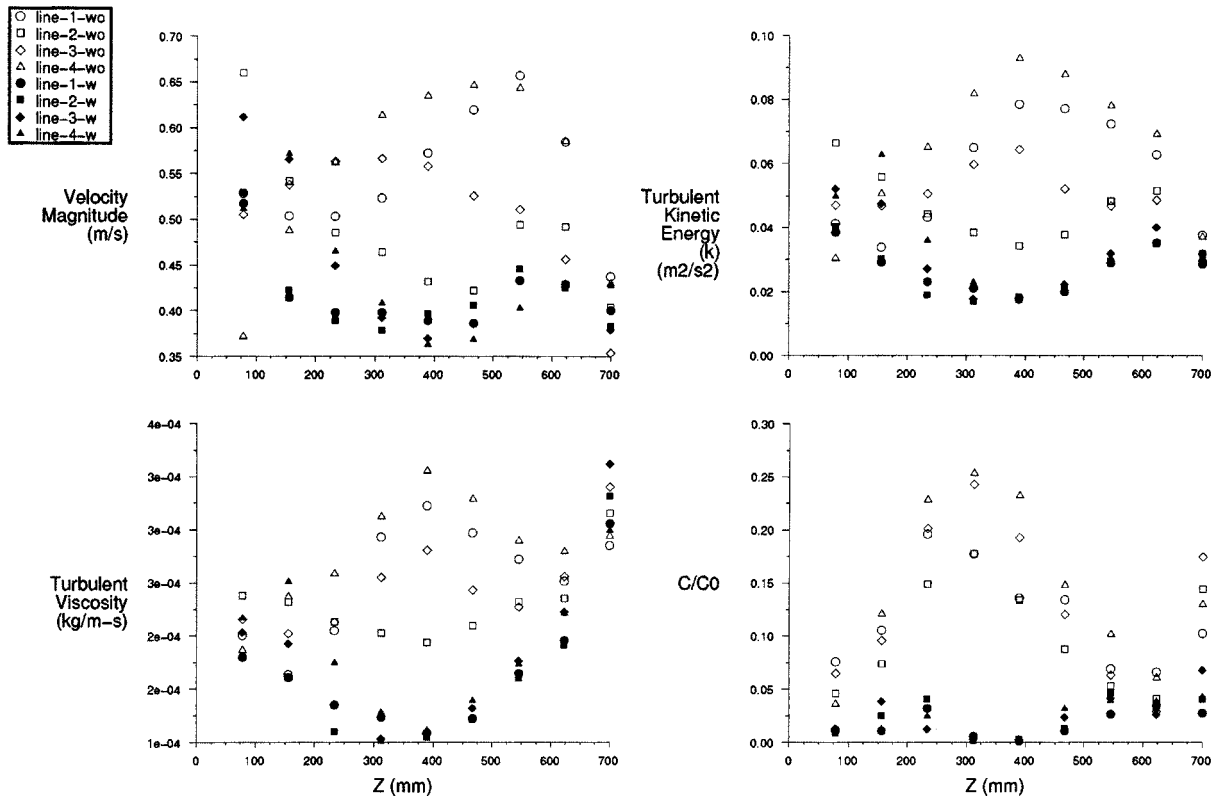


Fig. 4. Profiles of the mean velocity, turbulent kinetic energy, turbulent viscosity and normalized particle concentration on the surfaces of bag filters with and without an 'Inner Tube 3456'.

여과포 표면으로의 난류확산 정도는 난류운동에너지와 난류점도의 크기 분포로부터 알 수 있다. 여과포 표면에서의 난류운동에너지와 난류점도 크기는 내통이 없는 경우 유입관이 위치하는 수평단면 영역 근처 ($Z=400$ mm)에서 가장 높다. 그러나 내통이 있는 경우는 난류 유동이 내통에 의하여 차단되기 때문에 여과포 중간 부분에서 난류운동에너지와 난류점도가 가장 낮다. Fig. 4는 유입구에서의 입자의 평균농도로 나누어진 여과포 표면에서의 정상농도(normalized concentration, Fig. 4에 C/C_0 로 표기되어 있음) 분포 또한 보여준다. 내통이 없는 경우, 난류의 전달이 여과포 표면의 중간부분으로 활발히 이루어지므로 입자의 농도 분포가 여과포 중간부분에서 가장 높다. 그러나 내통이 있는 경우는, 유입관을 통하여 유입된 입자들의 여과포 방향으로의 직접적인 확산이 내통에 의하여 차단되고, 내통으로 차단되지 않은 집진용기의 상·하부 영역을 거쳐 입자들이 전달되기 때문에 여과포 상·하부 표면에서 입자 농도가 높게 나타난다. 또한 내통이 있는 경우 유입관을 통하여 유입된 입자들이 집진용기 내부와 내통의 벽면에 부착되기 때문에 여과포 표면에서의 입자농도가 전반적으로 낮아진다.

3-2. 내통 형상에 따른 집진용기 내부 유동장 및 유입입자의 거동 특성 변화

Fig. 1에서의 내통 1번부터 6번까지의 조합에 따른 여과포로의 입자부하율의 변화를 계산한 결과는 Fig. 5와 같다. 여과포로의 입자부하율(이하 '입자부하율'로 칭함)은 집진장치의 유입구를 통하여 유입된 입자들 중 집진장치 내의 벽면에 부착되지 않고 여과포 표면까지 도달하는 입자들의 비율로 정의하였다. 내통이 없는 경우(w/o Inner Tube) 입자부하율이 9.5%로 가장 높고, 내통이 1번부터 6번까지 모두 존재하는 경우(Inner Tube 123456) 입자부하율이 3.4%로 낮아진다. 'Inner Tube 123456'에서 6번 내통부터 차례로 제거됨에 따라 입자부하율은 증가하

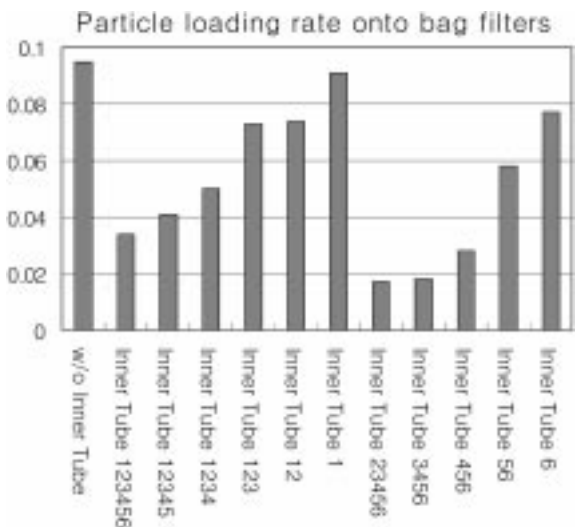


Fig. 5. Particle loading rate onto bag filters for the different types of inner tubes.

고, 1번 내통만 남은 경우(Inner Tube 1) 입자부하율이 내통이 없는 경우의 입자부하율에 근접하는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 'Inner Tube 123456'에서 1번 내통이 제거된 경우(Inner Tube 23456) 입자부하율은 1.7%로 가장 낮아지고, 그 다음 2번 내통부터 순서대로 제거됨에 따라 입자부하율은 점차 증가한다.

이와 같은 결과는 'Y=0' 단면에서의 속도벡터(Fig. 6)와 입자농도(Fig. 7) 분포의 비교로부터 그 원인을 살펴볼 수 있다. 내통이 없는 경우는 벽면 주위를 도는 순환유동으로부터 여과포 방향으로의 직접적인 대류

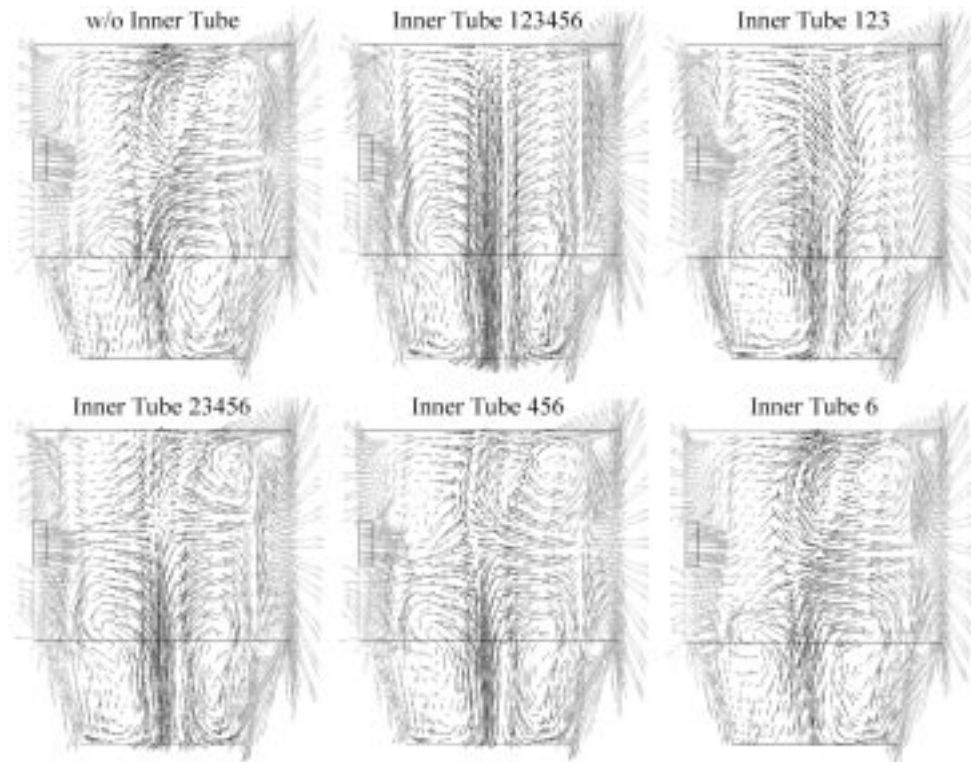


Fig. 6. Distributions of velocity vector for the different types of inner tubes.

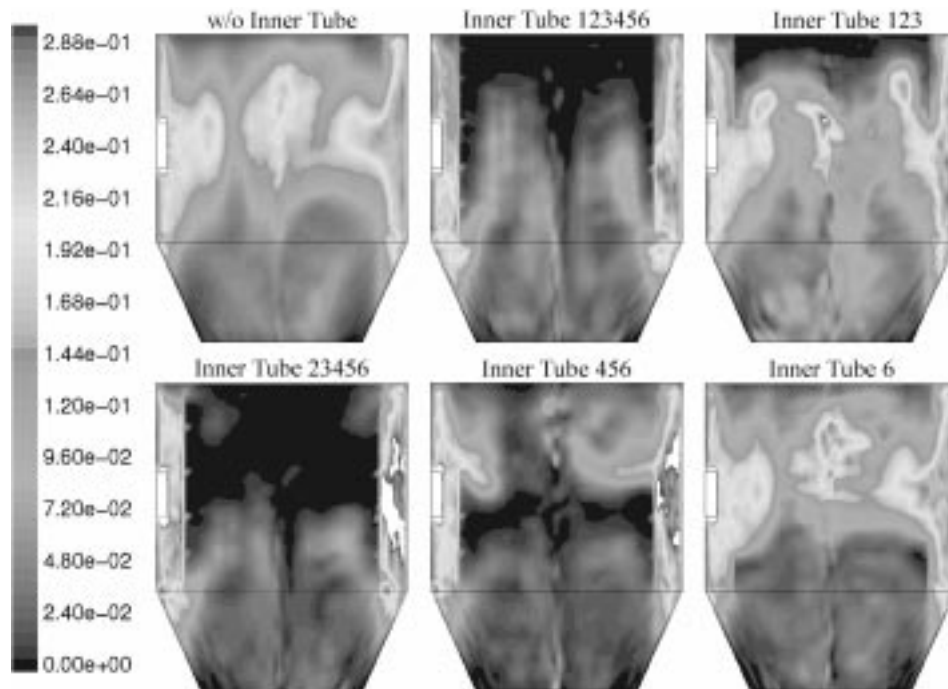


Fig. 7. Distributions of the normalized concentration of particles entering the vessel for the different types of inner tubes.

와 난류확산에 의하여 많은 유입입자들이 여과포 영역으로 이동하여 여과포 표면에 도달하기 때문에, 여과포로의 입자부하율이 높다. 그러나 'Inner Tube 123456'의 내통이 존재하는 경우는 벽면 주위의 순환유동으로부터 여과포 방향으로의 직접적인 대류와 난류확산이 차단되어 유입공기가 집진장치 하부를 지나 여과포로 이동하기 때문에, 집진용기 내벽과 내통 벽면에 부착되는 입자수가 증가하여, 여과포 표면으로의

입자부하율이 감소한다. 'Inner Tube 123456'에서 6번 내통부터 순서대로 제거됨에 따라 내통의 길이가 줄어들어 입자 부착면적이 감소하고, 또한 Fig. 7의 'Inner Tube 123'의 경우에서 볼 수 있는 바와 같이 유입입자들이 여과포 표면으로 직접 전달되기 때문에 입자부하율이 증가하게 된다. 이에 반하여 'Inner Tube 123456'에서 1번 내통이 제거된 'Inner Tube 23456'의 경우는 'Inner Tube 123456'의 경우보다 입자부하율이

더 낮는데, 그 이유는 Fig. 6의 속도벡터 분포로부터 알 수 있듯이 'Inner Tube 23456'의 경우 집진용기 상부를 통한(즉, 1번 내통이 있던 면을 통한) 대류와 난류 확산으로 인하여 'Inner Tube 123456'의 경우에는 나타나지 않는 집진용기 상부의 커다란 부차적 재순환류(secondary recirculating flow)가 존재하기 때문이다. 이 재순환류는 집진용기 하부로부터 상승하는 유동을 집진용기의 상부까지 이르지 못하게 하고 집진용기 중간 부분에서 다시 하부로 향하게 한다. 이로 인하여 집진용기 내벽과 내통 사이를 순환하면서 하부 영역을 지나 내통 내벽을 따라 여과포 영역으로 상승하는 입자들은 상부의 재순환류에 의하여 상부로의 이동이 저지되고 다시 하강하게 되므로, Fig. 7의 'Inner Tube 23456'의 경우에서

볼 수 있듯이 집진용기 하부로부터 여과포 상부 영역으로의 입자전달이 감소하게 된다. 물론 상부 벽 근처를 통하여(즉, 1번 내통이 있던 면을 통하여) 여과포 영역으로 유입되는 입자들도 있지만 하부를 거쳐 유입되는 입자량에 비하여 그 양이 아주 작은 것을 상부 벽 주위에서의 입자 농도로부터 알 수 있다. 그 다음 'Inner Tube 23456'에서 내통 2번부터 5번까지 차례로 내통이 제거됨에 따라 집진용기 상부 영역을 통하여 직접 여과포로 전달되는 입자의 양이 증가하기 때문에 여과포로의 입자부하율이 증가한다.

3-3. 내통 형상에 따른 침적입자의 재유입 특성 변화

집진된 후 자중이나 탈진에 의하여 하부 바닥면에 침적된 입자들은 집진용기 하부를 지나는 순환유동에 의하여 다시 상부로 재유입될 수 있다. Fig. 8은 내통 형상에 따른 바닥면으로부터 재유입되어 여과포 표면에 이르는 침적입자의 비율(이하 '재유입율'로 칭함)을 보여준다. 재유입율은 'Inner Tube 123456'인 경우 최대이고, 'Inner Tube 56'인 경우 최소이다. 'w/o Inner Tube'보다 'Inner Tube 123456'의 경우 재유입율이 더 높은 것은 Fig. 6의 속도벡터 분포로부터 알 수 있듯이, 'w/o Inner Tube'의 경우는 집진용기 바닥면 근처를 지나는 순환유동이 집진용기 내벽에 더 근접하여 상승하고 여과포 영역 중간부분에서 다시 하부로 향하지만, 'Inner Tube 123456'의 경우는 바닥면으로부터 상승하는 순환유동이 내통의 내부 벽면을 따라 집진용기 상부 끝벽면까지 도달한 후 다시 하부로 향하게 된다. 그 결과, Fig. 9의 입자농도 분포에서 볼 수 있는 바와 같이 'w/o Inner Tube'의 경우는 재유입 입자들이 하부 바닥면으로부터 집진용기 내벽 쪽으로 넓게 분포하여 부유되지만, 'Inner Tube 123456'의 경우는 집진용기 내벽과 내통 외벽 사이를 빠져나오는 유동에 의하여 집진용기 내벽 근처로 입자들이 재유입되지 못하고 내통 내벽을 따르는 순환 상승유동에 의하여 여과포 영역으로 유입되기 때문에 침적입자의 재유입율이 증가한다. Fig. 9에서 공백 부분은 좌측에 표시된 입자농도 자(scale)의 최대값 이상의 농도 영역으로써, 낮은 농도 영역을 명확히 나타내기 위한 조치로 인한 것이다.

'Inner Tube 123456'에서 하부 내통 6번부터 4번까지 차례로 제거될

Reentrainment rate of particles from the bottom wall

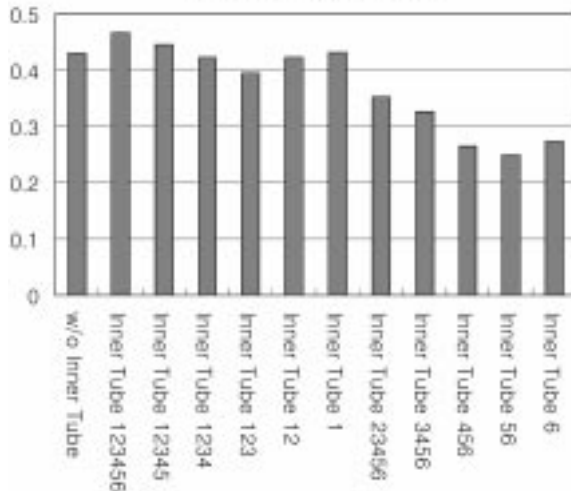


Fig. 8. Reentrainment rate of the particles from the bottom wall of the vessel for the different types of inner tubes.

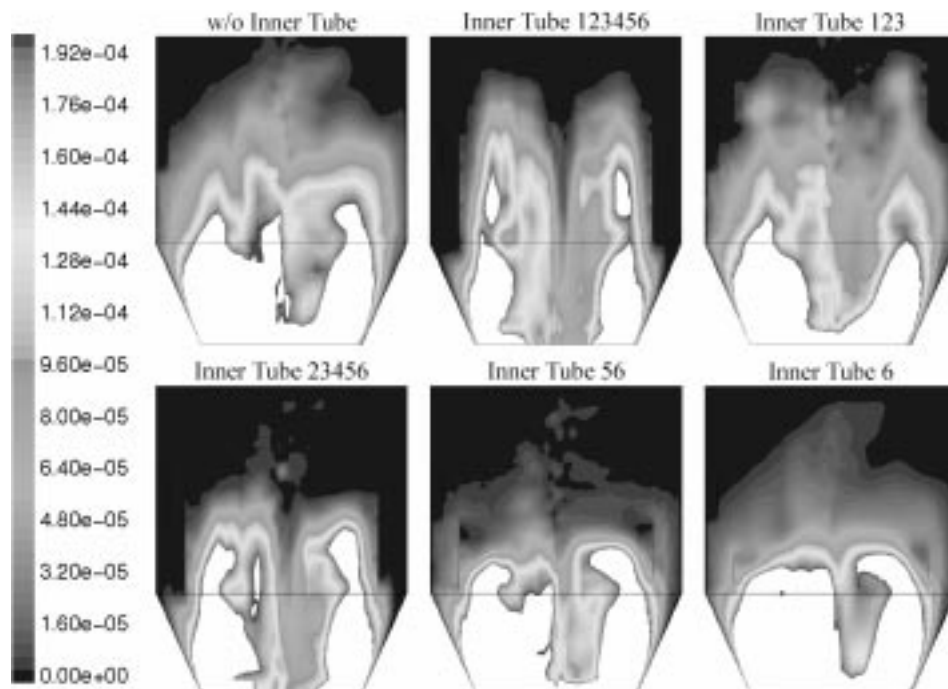


Fig. 9. Distributions of the normalized concentrations of particles reentrained from the bottom wall of the vessel for the different types of inner tubes.

경우 재유입율은 감소하는데, 그 이유는 내통의 길이가 상부 방향으로 줄어들어 따라 'w/o Inner Tube'의 경우와 같이 재유입 입자들의 확산이 집진용기 내벽 근처까지 넓게 이루어져 여과포 영역으로의 입자 전달량이 감소하기 때문이다. 'Inner Tube 123'의 경우 재유입율이 'w/o Inner Tube'의 경우보다 더 낮은 이유는, Fig. 6의 속도벡터 분포에서 볼 수 있듯이, 'w/o Inner Tube'의 경우는 집진용기 상부의 중심축 주위를 상승 속도벡터가 넓게 분포하지만, 'Inner Tube 123'의 경우는 내통 내벽을 따라 상승 속도벡터가 분포하고 중심축 주위에 하강 속도벡터가 분포하기 때문이다. 즉 'w/o Inner Tube'의 경우는 집진용기 상부에서 재유입 입자들이 여과포 영역으로 직접 전달되지만, 'Inner Tube 123'의 경우는 입자들이 내통 벽면을 따라 상부 끝벽면까지 상승하면서 벽면에 부착되고 부착되지 못한 입자들은 중심축 주위를 따라 하강하며 순환하기 때문에 상대적으로 여과포 영역으로 전달되는 재유입 입자의 양이 감소하게 된다. 'Inner Tube 123'에서 내통 3번과 2번이 제거된 경우는 다시 재유입율이 증가하는데, 그 이유는 집진용기 상부영역의 내통 차단 효과가 줄어들어 'w/o Inner Tube'의 경우와 유사하게 재유입 입자들이 집진용기 상부의 넓은 영역으로 확산되기 때문이다.

이에 반하여 내통 'Inner Tube 123456'에서 내통 1번이 제거된 'Inner Tube 23456'의 경우는 'Inner Tube 123456'의 경우보다 재유입율이 훨씬 더 낮다. 이는 Fig. 6의 속도벡터 분포에서 설명되었던 바와 같이 상부 영역의 재순환류가 재유입 입자들의 상부로의 이동을 방해하기 때문이며, Fig. 9에서의 여과포 상부 영역의 입자농도 분포로부터 명확히 확인된다. 그 다음 내통 2번부터 4번까지 순서대로 제거됨에 따라 재유입율은 감소하며, 그 이유는 상부의 재순환류가 더 비대해져 상부로의 입자들의 재유입을 더욱 더 방해하기 때문이다. 그러나 6번 내통만 남은 경우(Inner Tube 6)는 'Inner Tube 56'의 경우에 비하여 재유입율이 약간 증가하는데, 그 이유는 내통의 면적이 감소하여 입자의 부착면적이 줄어들기 때문이다. 그럼에도 불구하고 'Inner Tube 6'이 설치된 경우의 재유입율이 내통 벽면으로의 입자부착으로 인하여 'w/o Inner Tube'의 경우에 비하여 아주 낮은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

접선유입방식의 원심 순환유동식 여과포 집진장치에서 여과포로의 유입입자들의 입자부하량(particle loading)과 침적입자들의 재유입(reentrainment)량을 줄이기 위한 최적의 내통 구조를 설계하기 위하여 수치시뮬레이션을 수행하였다.

내통이 설치되지 않은 원심 순환유동식 여과포 집진장치 내부는 끝벽면 효과(end-wall effect)와 여과포로 인한 압력저항에 의하여 재순환유동(recirculating flow)들로 이루어진 아주 복잡한 유동장이 형성되었다.

내통이 없는 경우 입자부하량이 최대였으며, 내통이 설치된 경우 내통은 집진용기 내부로 유입된 입자들의 여과포 영역으로의 직접적인 대류전달과 난류확산 효과를 차단시켜 여과포 표면으로의 입자부하량을 감소시켰으며, 내통의 길이가 감소함에 따라 집진면적의 감소로 인하여 입자부하량이 증가하였다. 내통의 형상에 따른 여과포로의 입자부하량을 계산한 결과, 내통이 'Inner Tube 123456'인 경우보다는 오히려 'Inner Tube 23456'인 경우 입자부하량이 더 낮아 최소임을 알 수 있었다. 즉, 집진용기의 상부가 내통에 의하여 차단된 경우보다 상부의 일부가 개방된 경우가 여과포로의 입자부하량이 더 감소하였다.

집진용기 바닥면에 모여있는 침적입자들의 여과포로의 재유입(reentrainment)량을 내통 조건별로 계산한 결과, 내통이 없는 경우보다는 오히려 내통 'Inner Tube 123456'이 설치된 경우 재유입 입자량이 더 높아 최대였으며, 'Inner Tube 56'이 설치된 경우 최소였다. 즉, 집진용기의 상부가 내통에 의하여 차단된 경우보다 상부가 개방된 경우 침적입자의 재유입량도 더 감소하였다.

참고문헌

1. Ogawa, A.: "Separation of Particles from Air and Gases," CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida(1984).
2. Yoo, K. J. and Lee, J. Y.: "Study on the Economic Assessment for Particulate Control Equipments," Yonsei Univ., Mechanical Eng. Dpt., MS thesis(1993).
3. Gregg, W. and Davies, G. J.: "Improving Pulse-Jet Dust Collector Operation: The Effect of Gas Stream Inlet Design," The User and Fabric Filtration Equipment VI, Proceedings of an International Specialty Conference, Toronto, Ontario, 37(1992).
4. Yoa, S. J.: *J. KSEE*, **22**, 639(2000).
5. FLUENT 5 User's Guide, Fluent Inc.(1998).
6. Yakhot, V. and Orszag, S. A.: *J. Scientific Computing*, **1**, 1(1986).
7. GAMBIT 1 User's Guide, Fluent Inc.(1998).
8. Batchelor, G. K.: "An Introduction to Fluid Dynamics," Cambridge Univ. Press, Cambridge, England(1967).
9. Hinze, J. O.: "Turbulence," McGraw-Hill Publishing Co., New York(1975).
10. Choudhury, D.: "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling," Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107(1993).
11. Morsi, S. A. and Alexander, A. J.: *J. Fluid Mech.*, **55**, 193(1972).
12. Tennekes, H. and Lumley, J. L.: "A First Course in Turbulence," The MIT Press, Cambridge, Massachusetts(1972).