



전기집진기 내 유동 및 집진 현상에 대한 전기수력학 수치해석 연구

이 상혁¹, 허 남 건^{*2}

A NUMERICAL ANALYSIS ON ELECTROHYDRODYNAMICS (EHD) OF THE FLOW AND THE COLLECTION MECHANISMS INSIDE A ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

Sang Hyuk Lee¹ and Nahmkeon Hur^{*2}

In the present study, a numerical analysis on electrohydrodynamics (EHD) of the flow and the collection mechanism inside a electrostatic precipitator were investigated. The phenomena of the electrostatic precipitator include complex interactions between the electric field, the fluid flow and the particle motion. To validate the numerical method, the numerical computation for the electric field of a simple wire-pipe type electrostatic system having an analytic solution were performed. Using this numerical method, the electric field of the spiked electrostatic precipitator was simulated. And the fluid flow and the particle motion inside the spiked electrostatic precipitator were numerically analyzed.

Key Words : 전기수력학(Electrohydrodynamics), 전기집진기(Electrostatic Precipitator), 코로나방전(Corona Discharge)

1. 서 론

최근, 건물의 고층화와 터널의 장대화로 인해 건물 및 터널 내에서 먼지나 분진과 같은 오염 물질이 농축될 수 있다. 이러한 오염물질은 사람의 호흡기 계통에 위협을 주며, 환기 시스템의 원활한 작동에 문제를 초래한다. 따라서, 이와 같은 분진 입자들을 제거하기 위해 산업현장 및 환기시스템에서 다양한 형태의 전기집진기가 널리 사용되고 있다. 전기집진기는 코로나방전을 이용하여 공기 중에 부유하고 있는 분진에 전기장을 작용시켜서 입자들을 대전시킴으로써, 입자를 정전적인 힘으로 제거시켜 공기를 깨끗하게 하는 장치이다. 이러한 전기집진기 내 집진 현상은 전자기장 및 유체유동, 입자거동과 같은 다양한 현상이 복합적으로 서로 영향을 미치며 일어나기 때문에 이러한 현상을 서로 유기적으로 연관시켜 분석하여야 한다.

전기집진기 내 집진현상을 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Jedrusik 등[1]은 실험을 통해 다양한 대전전극을 사용하여 전기집진기 내 전자기장으로 인한 입자의 거동 속도를 분석하였다. 또한, Jedrusik 등[2]은 스파이크 대전전극을 사용하는 전기집진기의 대전전극 형상에 따른 집진 효율 특성을 얻기 위해 실험을 수행하였다. Chang 등[3]은 코로나방전이 작용하고 있는 실린더 주위의 전자기장으로 인한 유동 특성을 실험을 통해 분석하였다. 이와 같은 전기집진기의 특성을 얻기 위한 다양한 실험적 연구가 진행되었다. 그러나, 실험을 통한 연구는 전기집진기에서 일어나는 복합적인 현상의 근본적인 원인을 파악하는데 한계가 있다. 따라서, 실험적 연구와 더불어 수치해석을 통한 전기집진기 내 현상에 대한 연구가 수행되고 있다. Anagnostopoulos와 Bergeles[4]는 와이어-덕트 형태의 전기집진기에서 코로나방전으로 인한 전자기장 특성을, Nikas 등[5]은 와이어-덕트 형태의 전기집진기의 유동 및 집진 현상에 대해 수치해석하였다. Skodras 등[6]은 와이어-판 형태의 전기집진기의 집진 성능을 수치해석을 통해 얻었다. 균일한 전자기장이 작용하는 와이어 대전전극 뿐만 아니라 점, 핀 및 스파이크 형태의 대전전극을 사용하는 전기집진기에 대한 연구도 수행되었다. Yamamoto 등[7]은 수치해

1 서강대학교 대학원

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr



석을 통해 3차원 점 코로나로 인한 전기집진기 내 전자기장 및 유동 특성을 분석하였다. 또한, Fujishima 등[8]은 스파이크 형태 전극을 사용하는 전기집진기 내 특성을 수치해석을 통해 분석하였다. Kawamoto와 Umezu[9]는 핀-핀 사이에서 코로나 방전으로 인해 발생하는 이온풍에 대해 수치해석하였다.

본 연구에서는 전기집진기 내 전자기장으로 인한 유동 특성에 대해 수치해석하였다. 기존의 와이어-덕트 형태의 전기집진기 내 전자기장 특성을 비교하였다. 또한, 3차원의 스파이크 형태 대전전극을 사용하는 전기집진기의 전자기장 및 유동 특성에 대해 분석하였다.

2. 수치해석

전기집진기 내 집진현상은 크게 전자기장 및 유체유동, 입자거동이 복합적으로 일어난다. 이와 같은 각각의 현상은 서로 유기적으로 영향을 주기 때문에 전기집진기 내 현상을 구현하기 위해서는 이 현상들을 모두 고려하여야 한다.

2.1 전자기장

코로나 방전에 노출되어 있는 입자의 전하량은 입자에 미치는 쿨롱힘을 결정하게 된다. 입자의 흐름에 따라 입자 전하량 q_p 는

$$\frac{dq_p}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{\tau q_{max}}(q_{max} - q_p) & \text{if } q_p < q_{max} \\ 0 & \text{if } q_p \geq q_{max} \end{cases} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 포화 전하량 q_{max} 는

$$q_{max} = q_{sat} = \frac{3\pi\epsilon_o\epsilon_r E d_p^2}{\epsilon_r + 2} \quad (2)$$

이며, 입자가 포화 전하량의 절반에 도달하는 시간 τ 는

$$\tau = \frac{4\epsilon_o}{\rho_{ion} k_{ion}} \quad (3)$$

와 같다. 여기서, E 는 전기장 세기, ϵ_o 는 자유공간에서 유전율, ϵ_r 는 가스의 상대 유전율, k_{ion} 은 이온의 이동률이다.

이와 같은 입자에 미치는 쿨롱힘을 결정하기 위해서는, 전자기장 특성이 계산되어야 한다. 전기포텐셜 ϕ 는 간략한 수송 방정식 형태로

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k^2} = -\frac{\rho_{ion}}{\epsilon_o} \quad (4)$$

와 같다. 또한, 전기장 E_i 는

$$E_i = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (5)$$

이다. 위에서 얻은 전기장의 특성으로부터 이온전하량 밀도 ρ_{ion} 은

$$\rho_{ion}^2 = \epsilon_o \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_i} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (6)$$

와 같다. 이와 같은 과정을 통해 얻은 전기포텐셜 및 전기장, 이온전하량 밀도에 대한 계산을 반복 수행함으로써 전기집진기의 전자기장 특성을 얻을 수 있다.

2.2 유체의 유동

일반적으로 전기집진기 내에 흐르는 유체는 단일 가스이거나 혼합 가스이다. 이와 같은 가스의 유동을 해석하기 위해서, 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD[10]를 이용하여 필터 내에 흐르는 유체를 단상으로 가정함으로써 다음과 같은 질량 및 운동량 보존 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho U_i U_k - (\mu + \mu_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{Dk} + \rho_{ion} E_i \quad (8)$$

여기서, 운동량 보존 방정식의 f_{Dk} 는 입자의 거동으로 인한 항력, $\rho_{ion} E_i$ 는 전자기장으로 인한 유체에 작용하는 쿨롱힘의 영향을 나타낸다.

2.3 입자의 거동

전기집진기를 통과하는 먼지와 분진과 같은 입자의 집진을 구현하기 위해서는 입자의 거동에 대한 해석을 동반해야 한다. 이를 위해 STAR-CD[10]의 라그랑지안 모델을 사용하여 입자 거동에 대한

$$\frac{dx_i}{dt} = V_p \quad (9)$$

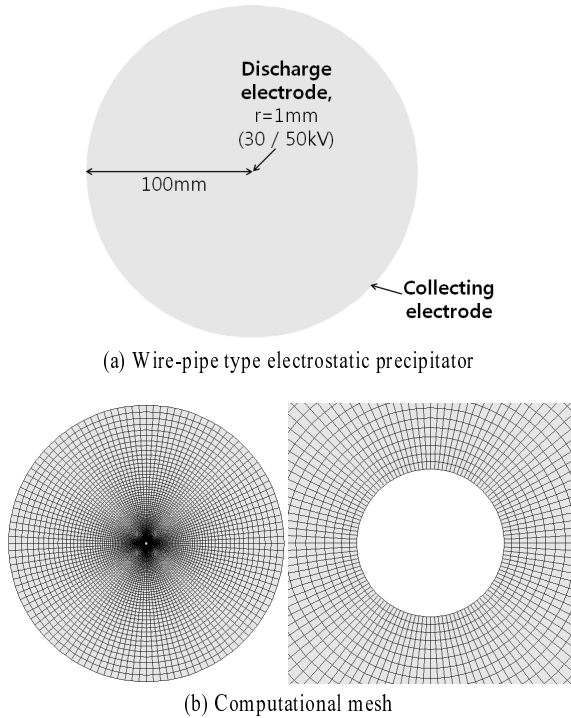


Fig. 1 Geometry and computational mesh of a wire-pipe type electrostatic precipitator[11]

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = f_{Dx} + m_p \frac{g_i (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + q_p E_i \quad (10)$$

와 같은 식을 사용하였다. 여기서, $q_p E_i$ 는 전자기장으로 인한 입자에 작용하는 쿨롱힘이다.

3. 수치 해석 결과

3.1 기존 전자기장 연구와 비교

전기집진기의 전자기장 및 유동의 특성에 대한 수치해석에 앞서, 본 연구에서 사용한 수치해석 방법에 따른 결과를 이론적 결과와 비교하였다. Townsend[11]은 단순한 형상의 와이어-파이프 형태의 전기집진기의 전자기적 특성을 이론적 연구를 통해 분석하였다. 이에 대해 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같은 형상을 갖는 전기집진기에 대해 Fig. 1(b)와 같은 해석 격자를 사용하여 전자기장 특성을 수치해석하였다. 이 전기집진기에서 집진전극인 파이프의 반경은 100 mm이고 대전전극인 와이어의 반경은 1 mm로, 대전전극에 30 kV와 50 kV의 전압을 적용하였다. 또한, 대전전극에서 임계 전압을 $6.E+6$ V/m을 적용함으로써, 와이어-파이프 형태의 전기집진기에 대한 2차원

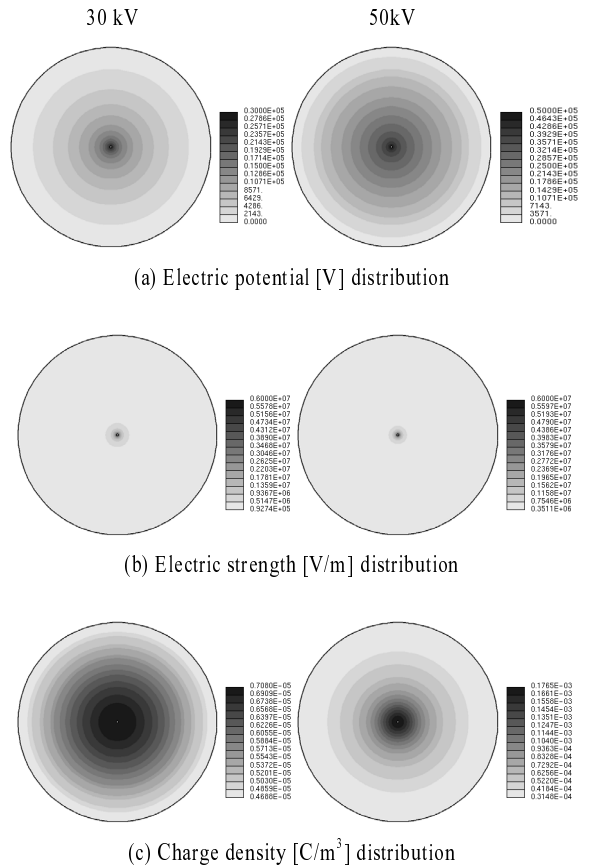
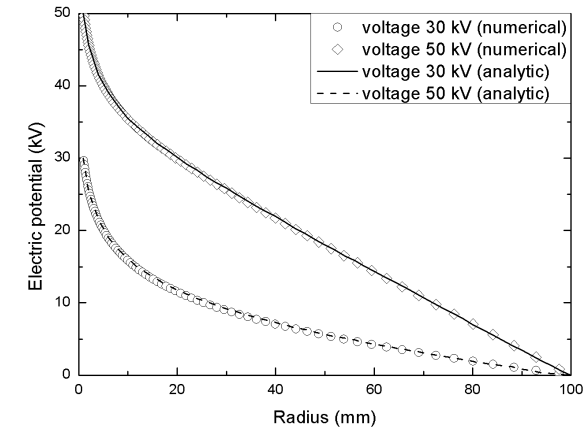


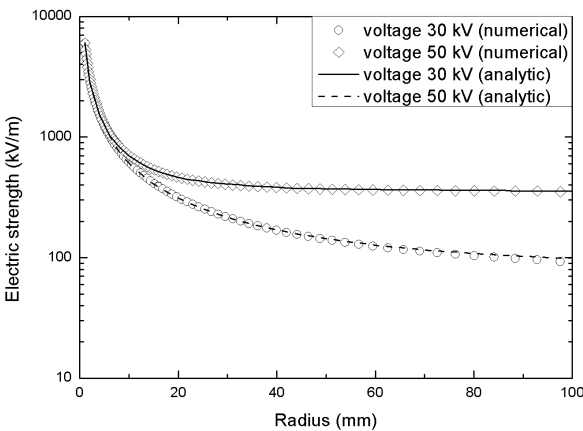
Fig. 2 Electric field of a wire-pipe type electrostatic precipitator

전자기장 수치해석을 수행하였다.

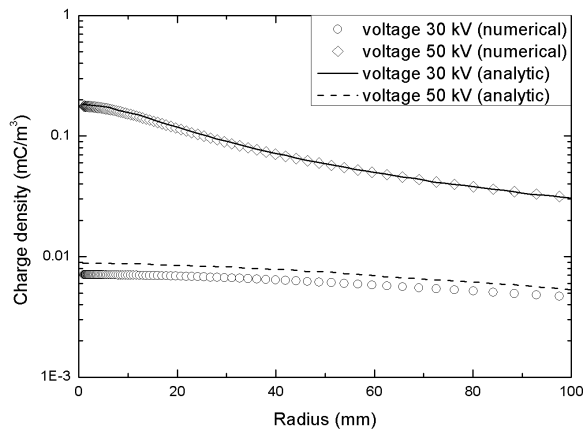
Fig. 2는 전자기장 수치해석을 통해 얻은 30 kV 및 50 kV로 대전되었을 경우의 전자기장 특성을 보여주고 있다. 이를 보면, 전압이 높은 대전전극을 중심으로 전압이 낮은 집진전극 방향으로 전자기장이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 때, 대전전극 주변에서의 전자기장이 크게 작용하며, 집진전극으로 갈수록 전자기장의 세기는 일정해진다. 또한, 50 kV의 높은 전압이 작용할 경우 대전전극 주변에 이온전하량이 낮은 전압이 작용할 경우 보다 더 많이 집중되었다. 이와 같은 수치해석 결과를 기존 이론적 결과와 Fig. 3과 같이 비교하였다. 이를 보면, 기존 이론적 결과와 수치해석 결과가 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이온 전하 밀도의 결과에서 30 kV의 전압이 작용시 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 식 (6)으로부터 이온 전하 밀도를 계산하는데 있어, 낮은 전압이 작용할 경우 이온 전하 밀도에 따른 전자기장의 차이가 크지 않아 수치해석시 이온 전하 밀도가 충분히 수렴하지 않았지만 전체적인 전자기장의 수렴조건을 만족하



(a) Electric potential distribution

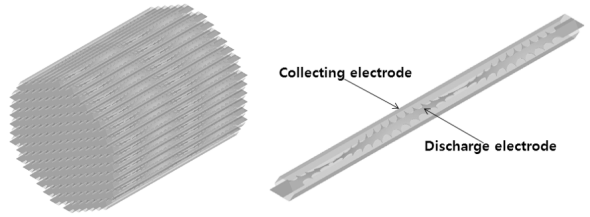


(b) Electric strength distribution

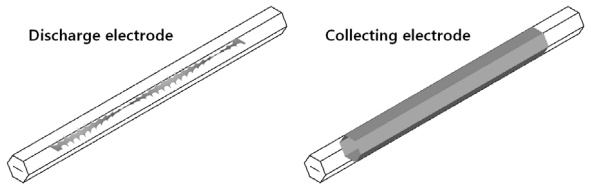


(c) Charge density distribution

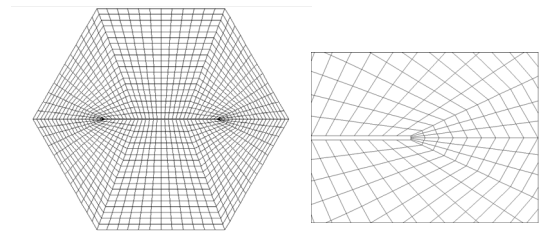
Fig. 3 Comparison of the electric field obtained by the numerical and analytical study



(a) Geometry of an electrostatic precipitator



(b) Discharge and collecting electrode



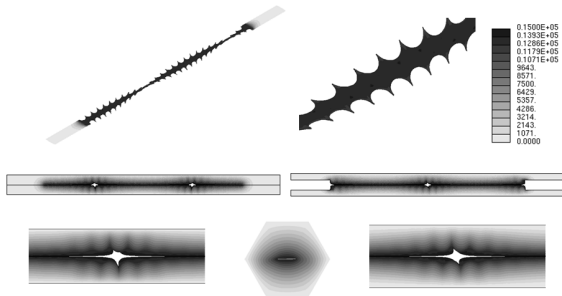
(c) Computational mesh

Fig. 4 Geometry and computational mesh of a spiked electrostatic precipitator

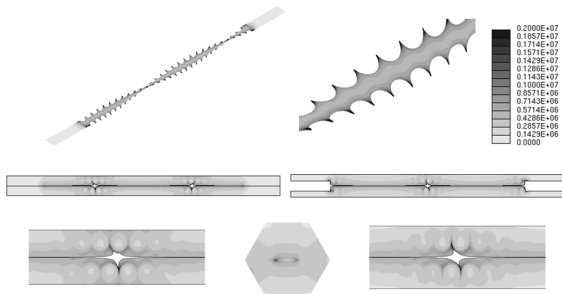
여, 이온 전하 밀도 결과가 이론적 결과와 다소 차이가 발생한 것으로 보인다.

3.2 스파이크 형태 전기집진기 내 전자기장 특성

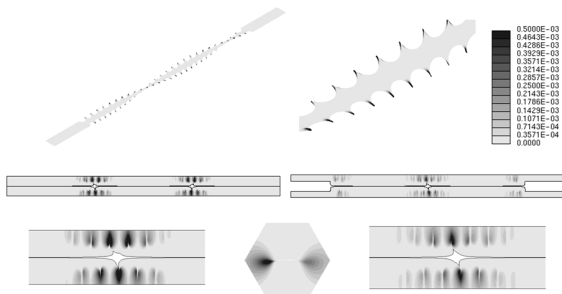
본 연구에서는 Fig. 4(a)와 같은 스파이크 형태의 전기집진기의 특성에 대해 수치해석하였다. 이 전기집진기는 벌집형태의 집진전극 중앙에 스파이크 형태의 대전전극이 나선으로 꼬여져 있는 형상을 갖는다. 이에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 1 m의 전기집진기 포함하여 전체 1.5 m를 Fig. 4(b)와 같이 해석 영역으로 설정하여, Fig. 4(c)와 같은 약 118만개의 해석 격자를 구성하였다. 전자기장 특성에 대한 수치해석을 위해, 본 연구에서 사용한 전기집진기의 작동 조건인 15 kV의 전압과 1 mA의 전류를 적용하였다. 본 연구에서는 스파이크 형태 전기집진기 내 연속적인 전자기장 특성에 대해 수치해석하기 위해, 대전전극의 전면의 임계 전압을 일정하다고 가정하였다. 수치해석 결과, 이 전기집진기의 작동 조건을 만족하는 임계 전압은 11.84×10^6 V/m을 갖는다. 이 때, 스파이크



(a) Electric potential [V] distribution



(b) Electric strength [V/m] distribution



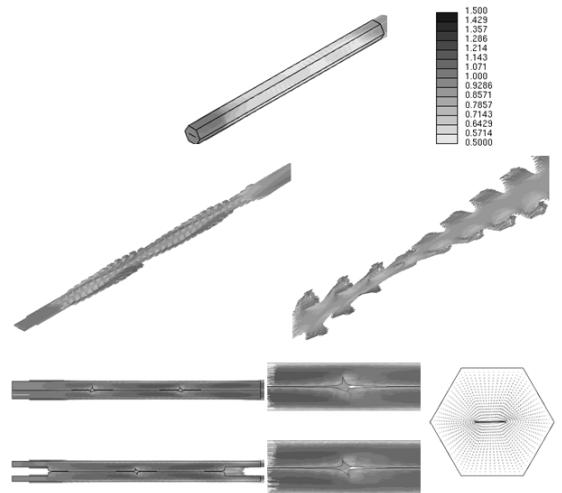
(c) Charge density [C/m³] distribution

Fig. 5 Electric field of a spiked electrostatic precipitator

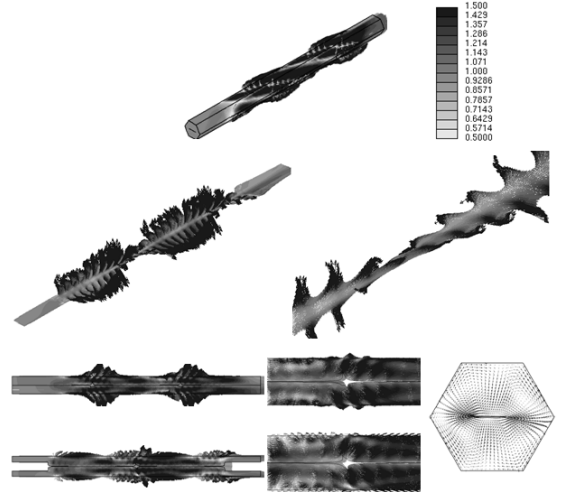
형태 전기집진기 내 전기장 특성은 Fig. 5와 같다. 전기포텐셜은 대전전극 주변에서 15 kV의 값을 가지며, 집진전극에 가까워질수록 전압이 낮아진다. 대전전극의 날카로운 부분에서는 높은 이온전하밀도를 갖게 되며, 이로 인해 전기장의 세기가 크게 된다. 따라서, 전기집진기 내 유동 및 입자의 거동에 영향을 미치는 쿨롱힘이 대전전극의 스파이크 부분에서 크게 작용하게 된다.

3.3 스파이크 형태 전기집진기 내 유동 특성

위와 같은 전기장 특성을 갖는 스파이크 나선형 전기집



(a) Without the electric force



(b) With the electric force

Fig. 6 Flow distribution inside a spiked electrostatic precipitator

진기 내 1 m/s의 입구 속도를 갖는 공기의 유동에 대해 수치 해석하였다. Fig. 6은 전기장 여부에 따른 스파이크 나선형 전기집진기 내 속도 분포를 보여준다. 전기장의 유무에 따라 전기집진기 내 공기의 유동이 변하게 된다. 전기장이 고려되지 않은 경우에는 입구에서 유입된 공기는 스파이크 나선형의 대전전극을 따라 전기집진기를 통과하게 된다. 그러나, 전기장이 고려된 경우는 대전전극에서 집진전극 방향으로 쿨롱힘이 작용하게 되어, 바깥 방향으로 가스를 밀어내는 유동이 발생하게 된다. 특히, 큰 전기장이 형성되는 스파이크 부분에서 바깥 방향으로 밀어내는 유동이 크게 발생한다.

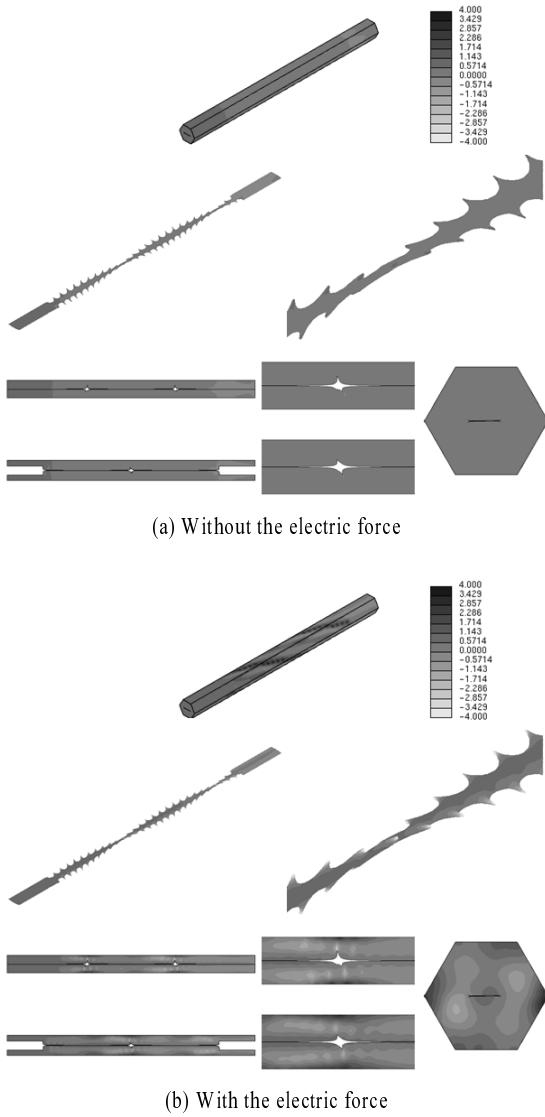


Fig. 7 Pressure distribution inside a spiked electrostatic precipitator

Fig. 7은 전자기장 여부에 따른 스파이크 나선형 전기집진기 내 압력 분포를 보여준다. 전기집진기 내 압력 분포도 전자기장의 영향으로 압력 특성이 변하게 되며, 쿨롱힘으로 인해 대전전극인 스파이크 부근에서 바깥 방향으로 밀려나는 공기와 입자로 인해 집진전극 쪽에 높은 압력이 작용하게 된다.

3.4 스파이크 형태 전기집진기 내 입자의 거동

스�파이크 나선형 전기집진기를 통과하는 공기와 더불어 입자도 전자기장의 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 전자기장에 따른 입자의 거동을 알아보기 위해서, 1 m/s의 입구 속도

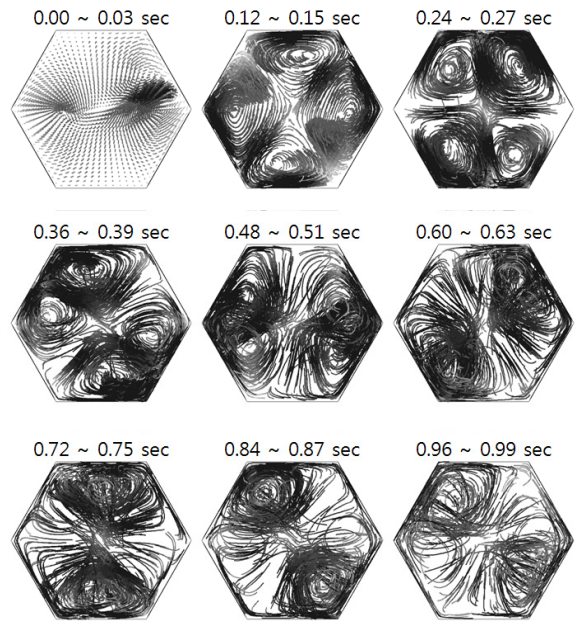


Fig. 8 Behavior of the particles inside a spiked electrostatic precipitator

를 갖는 공기를 따라 전기집진기 내로 유입되는 2 μm 크기의 분진의 거동에 대해 수치해석하였다. 전자기장에 노출된 분진 입자도 공기와 같이 대전된 쿨롱힘에 영향을 받게 된다. Fig. 8은 스파이크 나선형 전기집진기 내 전자기장의 영향을 받은 분진 입자의 거동을 나타낸다. 이를 보면, 대전전극에서 집진전극 방향으로 작용하는 쿨롱힘으로 인해 입자가 바깥 방향으로 밀려나는 것을 볼 수 있다. 이 때, 큰 전자기장이 작용하는 스파이크 부분에서 입자가 바깥방향으로 큰 속도를 가지며 밀려나게 되며, 나선형으로 꼬여 있는 대전전극으로 인해 전기집진기를 통과하는 동안 바깥 방향으로 밀려나는 입자는 관성을 더 받게 된다. 이와 같은 전기집진기 내 입자에 작용하는 전자기장으로 인해, 시간이 지남에 따라 전기집진기 내로 유입된 분진 입자는 벽면에 집진된다.

4. 결론

본 연구에서는 전기집진기 내 유동 및 집진 현상에 대한 전기수력학적 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 코로나방전을 이용하여 분진을 제거시키는 전기집진기 내 집진 현상은 전자기장 및 유체유동, 입자거동과 같은 다양한 현상이 복합적으로 작용한다. 이와 같은 전기집진기 내 현상을 해석하기 위해서는 이러한 현상들을 유기적으로 연관시켜 분석하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 현상에 대한 수치해석에 앞



서, 이론적 해를 갖는 와이어-파이프 형태의 전기집진기 내 전자기장 특성을 수치해석 하였다. 수치해석 결과는 이론적 해와 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 이와 같은 해석 방법을 이용하여, 스파이크 나선형 전기집진기의 전자기장 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 스파이크 나선형 전기집진기는 스파이크 부분에서 큰 전자기장이 형성되는 것을 볼 수 있었으며, 이는 전기집진기를 통과하는 유체의 유동 및 입자의 거동에 영향을 미쳤다. 전기집진기 내 형성된 전자기장은 유체 및 입자를 대전전극에서 집진전극으로 밀려나게 함으로써, 전기집진기 내 분진 입자를 제거하는 현상을 보였다.

참고문헌

- [1] 2001, Jedrusik, M., Gajewski, J.B. and Swierczok, J., "Effect of the Particle Diameter and Corona Electrode Geometry on the Particle Migration Velocity in Electrostatic Precipitators," *Journal of Electrostatics*, Vol.51-52, pp.245-251.
- [2] 2003, Jedrusik, M., Swierczok, A. and Teisseyre, R., "Experimental Study of Fly Ash Precipitation in a Model Electrostatic Precipitator with Discharge Electrodes of Different Design," *Powder Technology*, Vol.135-136, pp.295-301.
- [3] 2006, Chang, J.S., Brocilo, D., Urashima, K., Dekowski, J., Podlinski, J., Mizeraczyk, J. and Touchard, G., "On-set of EHD Turbulence for Cylinder in Cross Flow under Corona Discharge," *Journal of Electrostatics*, Vol.64, pp.569-573.
- [4] 2002, Anagnostopoulos, J. and Bergeles, G., "Corona Discharge Simulation in Wire-duct Electrostatic Precipitator," *Journal of Electrostatics*, Vol.54, pp.129-147.
- [5] 2005, Nikas, K.S.P., Varonos, A.A. and Bergeles, G.C., "Numerical Simulation of the Flow and the Collection Mechanisms inside a Laboratory Scale Electrostatic Precipitator," *Journal of Electrostatics*, Vol.63, pp.423-443.
- [6] 2006, Skodras, G., Kaldis, S.P., Sofialidis, D., Faltsi, O., Grammelis, P. and Sakellaropoulos, G.P., "Particulate Removal via Electrostatic Precipitators - CFD Simulation," *Fuel Processing Technology*, Vol.87, pp.623-631.
- [7] 2006, Yamamoto, T., Morita, Y., Fujishima, H. and Okubo, M., "Three-dimensional EHD Simulation for Point Corona Electrostatic Precipitator Based on Laminar and Turbulent Models," *Journal of Electrostatics*, Vol.64, pp.628-633.
- [8] 2004, Fujishima, H., Ueba, Y., Tomimatsu, K. and Yamamoto, T., "Electrohydrodynamics of Spiked Electrode Electrostatic Precipitators," *Journal of Electrostatics*, Vol.62, pp.291-308.
- [9] 2008, Kawamoto, H. and Umezu, S., "Electrostatic Micro-ozone Fan that Utilizes Ionic Wind Induced in Pin-to-plate Corona Discharge System," *Journal of Electrostatics*, Vol.66, pp.445-454.
- [10] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.
- [11] 1914, Townsend, J.S., "The Potentials to Maintain Currents between Coaxial Cylinders," *Philos. Mag. J. Sci.*, Vol.28, pp.83-90.