

불평등 전기 하 액체유동 내 입자 운동 해석

Analysis of Particles Motion in Liquid Flow in Non-uniform Electric Field

정 한 백* · 서 경 식* · 최 찬 영* · 박 일 한†

(Han-Baek Chung · Kyung-Sik Seo · Chan-Young Choi · Il-Han Park)

Abstract - In this paper, we propose a separation method of the dielectric particles in the liquid flow. Since particles are dielectric in most cases, they experience dielectrophoretic(DEP) force under non-uniform electric field. The field characteristics in the electromagnetic and fluid dynamic systems are solved by using the finite element method. The motional equation of the particles is calculated by the Runge-Kutta method. The field analysis shows the feasibility of the proposed method. The particle separation model with large DEP force exerting on particles is designed by analyzing field characteristics.

Key Words : Dielectrophoresis, Numerical analysis, Finite element method, Particle separation model, Flow capacity

1. 서 론

유전영동력(dielectrophoretic force)을 이용한 미세입자의 제어기술은 그 유용성을 인정받아 여러 공학 응용과학 분야에서 사용되고 있다. 예를 들어 세포와 DNA를 분리하거나 우주탐사선의 태양전지 표면의 먼지를 제거하기 위해 이 기술을 사용한다[1, 2]. 최근에는 공기 중 미세먼지를 제거하는 연구도 진행 중이며 실험을 통해 그 유효성이 입증되었다[3-5]. 자연적으로 발생한 입자의 대부분은 유전적인 성질을 지니므로 유전영동력을 이용한 입자의 제어 기술은 더 넓은 분야에 응용 가능하다. 이를 위해서는 기존 논문에서의 공기 중 미세먼지 제거 연구를 넘어 다양한 액체에서 입자의 운동을 이해하는 것이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 액체 속의 입자가 받는 유전영동력을 이용하여 입자의 운동을 해석하고, 이를 바탕으로 액체와 입자를 분리하는 분리 모델을 설계하여 액체 내 미세입자 제어장치의 유효성을 검증한다. 액체 내 입자운동을 해석하기 위해 유한요소법(finite element method)을 통해 시스템의 전기 및 유속의 분포를 계산하고 Runge-Kutta 법을 통해 미세입자의 운동을 해석하였다. 본 논문을 통해 설계 변수 변경에 따른 액체에서의 입자 제어를 보인다.

2. 입자 운동 해석

2.1 입자 운동방정식

액체 내 입자들이 유전영동력, 항력, 부력, 중력을 받게 된다고 가정할 때, 이를 뉴턴의 운동방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F = \frac{d}{dt}(mv) = F_{DEP} + F_D + F_B + F_G \quad (1)$$

즉 액체 내 입자가 질량 m 을 가지고 v 의 입자속도로 움직일 때, 유전영동력 F_{DEP} , 항력 F_D , 부력 F_B 그리고 중력 F_G 의 합력으로 표현된다.

2.1.1 유전영동력

불평등 전기(non-uniform field) 하에서 전극보다 충분히 작은 크기의 구형 유전입자들은 분극된다. 이때 라플라스 방정식과 경계조건을 이용하면 쌍극자모멘트 p 는 식 (2)와 같이 유도된다.

$$p = 4\pi\epsilon_1 r^3 KE \quad (2)$$

여기서, ϵ_1 는 액체의 유전율, r 은 입자의 반경, E 는 인가된 전기, 그리고 K 는 Clausius-Mossotti Factor를 나타낸다. ϵ_2 가 입자의 유전율 일 때, K 는

$$K = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \quad (3)$$

로서, 구형입자의 분극 정도를 나타내는 값이다. 만약 $K > 0$ 이면, 쌍극자모멘트와 인가 전기의 방향이 같게 되고, $K < 0$ 이면 두 벡터의 방향은 반대가 된다. 불평등 전기에서 두 전

† Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea
E-mail : ihpark@skku.ac.rk

* School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

접수일자 : 2017년 4월 7일

최종완료 : 2017년 7월 10일

하로 모델링된 쌍극자모멘트는 서로 다른 크기의 힘을 받는데, 그림 1에서 쌍극자에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F = qE(r + dr) - qE(r) \quad (4)$$

이 때, 간격 d 가 충분히 작다고 할 때, 테일러 급수 전개에 의해

$$F = qd \cdot \nabla E = (p \cdot \nabla)E \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 이를 통해, 유전율을 가지는 유체에서 유전입자에 작용하는 힘인 유전영동력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = 2\pi\epsilon_1 r^3 K \nabla E_0^2 \quad (6)$$

여기서 상수 K 를 통해 마찬가지로 유전영동력의 특성을 알 수 있다. $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 이면, 쌍극자모멘트 p 는 전계의 방향과 같으며, 필드의 크기가 강한 쪽으로 움직이게 된다. 반면에, $\epsilon_2 < \epsilon_1$ 이면, 쌍극자모멘트 p 의 방향은 전계의 방향과 반대이며, 필드의 크기가 작아지는 쪽으로 움직이게 된다. 본 논문에서 해석하는 모델은 액체의 유전율이 입자의 유전율보다 크기 때문에 전계의 크기가 작아지는 쪽으로 움직이게 된다. 즉, 입자들은 불평등 정도가 심한 전극과 멀어지는 쪽으로 움직인다.

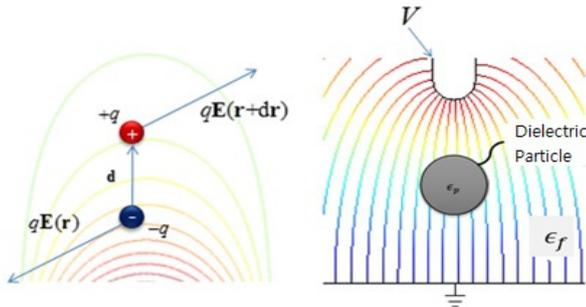


그림 1 불평등 전계 내 유전입자
Fig. 1 Dielectric particle in non-uniform electric field

2.1.2 항력

입자가 흐르는 액체에 존재하는 경우, 흐름이 층류 또는 난류임을 결정하기 위해 무차원 계수인 Reynolds number(Re)를 이용한다. 이는 액체 각 부분에 작용하는 관성력과 마찰력의 비율에 비례하고 있으며, 주어진 조건하에서 액체의 저항력을 나타내며, 또한 관성력과 마찰력 중 어느 것을 이용하는 것이 올바른 것인가를 결정한다. 다음 식을 통해 계산한다.

$$Re = \frac{\rho(u-v)d}{\eta} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 액체의 밀도이며, u 는 액체의 속도, v 는 입자의 속도, d 는 입자의 직경, η 는 점성계수를 나타낸다.

Re가 1보다 작은 경우, 입자 주변의 흐름이 층류(laminar flow)가 되며, 이때 점성력이 관성력에 비해 훨씬 큰 경우를 나타낸다. 그리고 Re가 1보다 크게 되면 입자의 하류측에 와류가 형성되고, Re가 커짐에 따라 와류가 점점 많아지게 된다. 마지막으로 관내 흐름인 경우 $Re < 4000$ 일 때 난류(turbulent flow)가 형성된다. 입자가 충분히 작을 경우 Re 값이 1보다 작게 되는데, 구형입자에 작용하는 총 저항력을 Stokes의 법칙을 사용하여 구할 수 있다. 이때 흐름이 비압축성이고, 입자 주변에 벽이나 다른 입자가 없으며, 일정한 운동을 하고 있음을 나타낸다. 입자에 작용하는 항력은 다음과 같다.

$$F_D = 6\pi\eta(u-v)R \quad (8)$$

여기서 η 는 액체의 점성계수, R 은 입자의 반경을 나타낸다.

2.1.3 부력과 중력

액체 안에서 입자들은 부력과 중력을 받게 된다. 입자의 밀도가 액체의 밀도보다 큰 경우, 입자는 부력보다 밀도로 침강하려는 중력을 더 받게 되는데, 이 때 합성식을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_B + F_G = (\rho_{par} - \rho_{fluid})gU_{par} \quad (9)$$

여기서 ρ_{par} 은 입자의 밀도, ρ_{fluid} 은 액체의 밀도, U_{par} 은 입자의 부피, g 는 중력가속도를 나타낸다.

2.2 수치해석법

액체유동에서 유전입자의 운동특성을 해석하기 위해 전계와 유체시스템의 다중물리해석을 하게 된다. 이때, 유한요소법을 이용하여 전계와 유체시스템에서의 지배방정식을 풀게 된다. 전계해석은 전위 인가 시 Poisson 방정식을 이용해 공간상의 전계를 해석하며 방정식 형태는 아래와 같다.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_q}{\epsilon} \quad (10)$$

이때, V 는 전계의 스칼라포텐셜이며, ρ_q 는 공간전하밀도, ϵ 은 유전율을 나타낸다. 유체해석은 Navier-Stokes 법칙을 이용하여 층류를 해석하며, 방정식 형태는

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = 0 \quad (11)$$

이다. 만약, 액체가 정상상태에서 비압축성이라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot u = \nabla^2 \phi = 0 \quad (12)$$

여기서 ϕ 는 유체의 스칼라 포텐셜이다. 또한, 입자의 운동방정식은 Runge-Kutta 기법을 이용해 수치적으로 계산하게 된다.

3. 입자분리기 모델 설계

그림 2는 불평등전계에서 발생하는 유전영동력을 이용하여 입자를 액체유동에서 분리하는 입자분리기 모델의 개념도를 나타낸다. 입자분리기에 전극이 (+)극, (-)극이 연속적으로 배치되어 있어 불평등 전계를 발생시킨다. 이 때 전극 간격은 전극크기에 맞게 입자분리율을 증가시킬 수 있도록 배치되어 있으며, 채널길이는 300 mm 로 고정되어 있다. 물에서 유전입자들이 일정한 속도로 입자분리기에 들어가면 입자들은 유전영동력을 받아 채널바닥까지 밀리게 되어 출구 2로 빠지게 되며, 입자와 분리된 물은 출구 1으로 빠지게 된다. 유한요소법과 Runge-Kutta 기법을 통해 지배방정식을 풀어 시간에 따라 입자에 작용하는 힘을 해석하고 위치를 구할 것이다. 전극에는 필름의 절연과피 전계가 일어나지 않을 정도의 전압을 인가한다. 그림 3과 그림 4에 유한요소법을 통한 입자분리기 모델의 전계 및 유동해석 결과를 나타내었다. 그림 3은 입자 분리기 모델에서 유한요소법 해석을 통한 전계 지배방정식을 해석한 그림이다. 그림에서 등고선을 통해 전극에서 멀어질수록 전계 크기의 구배가 작아짐을 확인할 수 있다. 그림 4는 유동해석을 나타낸 그림으로 분리기 모델에서의 속도 크기를 그림으로 나타내었다.

높은 입자분리율을 가지는 입자분리기 설계를 위해 고려할 수 있는 설계변수는 네 가지가 있다. 전극간격 및 이에

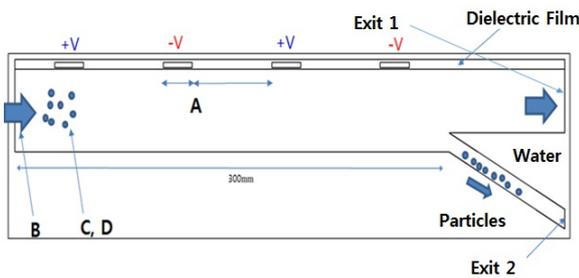


그림 2 입자 분리기 개념도
Fig. 2 Concept of particle separation model

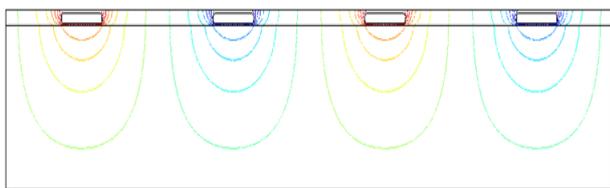


그림 3 입자 분리기 모델 전계 해석
Fig. 3 Electrostatic analysis of particle separation model

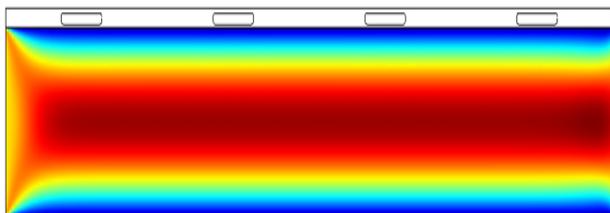


그림 4 입자 분리기 모델 유동 해석
Fig. 4 Fluid flow analysis of particle separation model

따른 전극크기, 유속, 입자의 직경, 그리고 입자의 유전율인데 각각 그림 2에 A, B, C, D 로 나타내었다. 이때, 설계 변수의 변화에 따라 입자분리기의 분리율이 최대가 되는 조건을 찾도록 한다.

4. 결과 및 토론

입구의 높이가 높을 때 입자분리가 가능하다면 입구의 높이가 작을 때보다 분리율이 높다고 할 수 있다. 입자 분리율을 높이기 위하여 전극 배치 설계가 필요한데, 전극 간 간격을 변화하면서 알아볼 수 있다. 전극 간 간격이 좁으면 전극 근처에서 전계 크기의 구배가 커지게 된다. 그렇지만 전계 크기의 구배는 전극과 멀어질수록 작아진다(그림 5). 반면에 전극 간 간격이 넓으면 전극 근처에서 전계 크기의 구배는 작지만 간격이 좁을 때보다 전계 크기의 구배 분포가 좋아진다(그림 6).

그림 7은 입자거동특성 해석결과로서, 입자의 시간에 따른 위치를 보여준다. 이를 통해 입자가 유전영동력을 받아 전극에서 멀어지면서 물과 분리되는 것을 확인했다. 전극 크기가 5, 10, 15, 20 mm 인 각각의 경우에서 전극 간 간격을

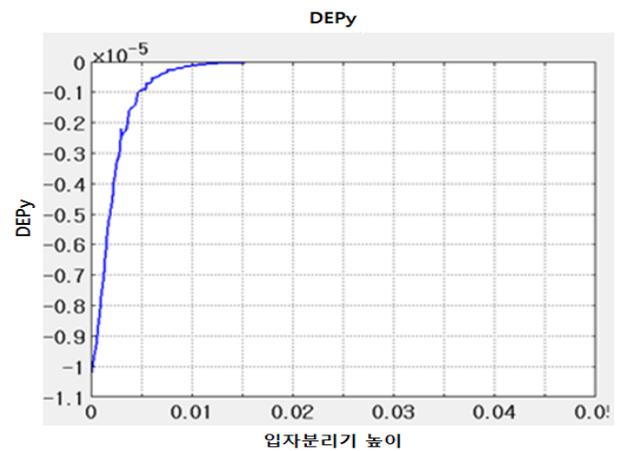


그림 5 유전영동력; 전극 간격: 16.43mm
Fig. 5 DEP force; distance between electrodes :16.43mm

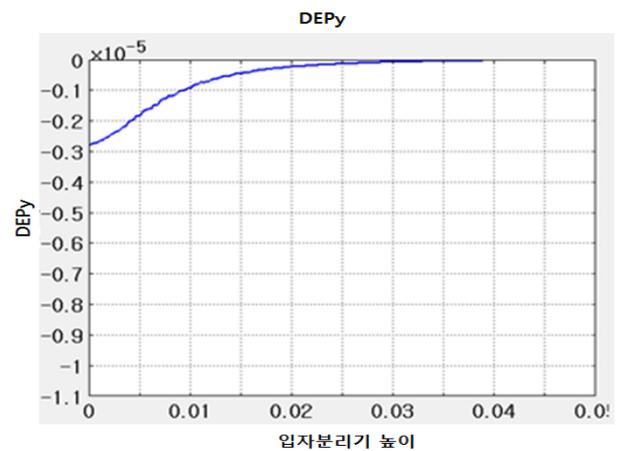


그림 6 유전영동력; 전극 간격: 55mm
Fig. 6 DEP force; distance between electrodes :16.43mm

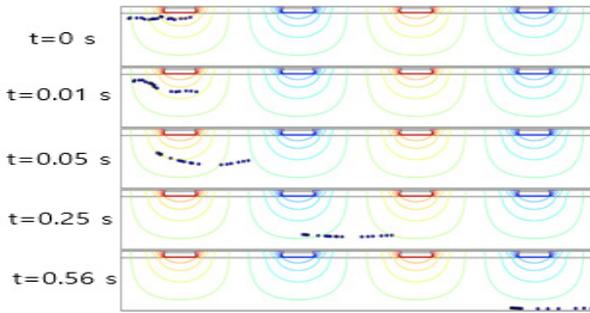


그림 7 시간에 따른 입자 위치
Fig. 7 Positions of the particles over time

표 1 입자 분리 필요 채널 높이
Table 1 Channel height required to separate the particles

Electrode gap (mm)		55				35				
Permittivity		5	10	20	30	5	10	20	30	
Particle diameter (μm) and velocity of flow (m/s)	80	3	2.18	2.04	1.82	1.66	2.1	2.00	1.83	1.67
		2	2.4	2.32	2.28	1.92	2.34	2.28	2.09	1.91
		1	3.2	2.99	2.78	2.50	3.1	2.79	2.60	2.43
		0.5	4	3.83	3.55	3.28	3.65	3.47	3.23	3.04
	40	3	1.17	1.06	1.00	0.92	1.15	1.09	0.99	0.91
		2	1.37	1.24	1.14	1.05	1.4	1.38	1.28	1.17
		1	1.82	1.65	1.53	1.39	1.89	1.74	1.62	1.47
		0.5	2.4	2.20	2.01	1.85	2.3	2.24	2.10	1.89
	20	3	0.73	0.59	0.52	0.49	0.60	0.59	0.54	0.50
		2	0.66	0.62	0.59	0.53	0.85	0.76	0.62	0.57
		1	1.06	0.91	0.84	0.72	1.07	0.93	0.85	0.80
		0.5	1.35	1.17	1.09	0.99	1.37	1.25	1.14	1.05
10	3	0.34	0.33	0.32	0.31	0.39	0.34	0.33	0.31	
	2	0.37	0.36	0.34	0.33	0.40	0.39	0.38	0.35	
	1	0.47	0.45	0.42	0.40	0.53	0.53	0.49	0.47	
	0.5	0.64	0.61	0.58	0.52	0.72	0.69	0.64	0.59	
Electrode gap (mm)		27.5				16.43				
Permittivity		5	10	20	30	5	10	20	30	
Particle diameter (μm) and velocity of flow (m/s)	80	3	1.75	1.72	1.59	1.45	1.3	1.26	1.18	1.09
		2	2	1.96	1.80	1.66	1.45	1.43	1.32	1.23
		1	2.53	2.38	2.22	2.04	1.78	1.61	1.58	1.45
		0.5	3	2.79	2.66	2.49	2.1	1.91	1.89	1.77
	40	3	1.03	0.95	0.87	0.81	0.83	0.81	0.77	0.69
		2	1.22	1.14	1.04	1.01	0.92	0.91	0.85	0.78
		1	1.60	1.49	1.37	1.27	1.23	1.15	1.05	0.97
		0.5	1.95	1.84	1.78	1.54	1.45	1.41	1.30	1.21
	20	3	0.67	0.55	0.51	0.48	0.49	0.47	0.44	0.41
		2	0.77	0.64	0.57	0.54	0.56	0.54	0.51	0.48
		1	0.97	0.83	0.76	0.72	0.71	0.69	0.64	0.59
		0.5	1.21	1.12	1.01	0.93	0.93	0.91	0.83	0.77
10	3	0.35	0.33	0.33	0.31	0.33	0.32	0.30	0.29	
	2	0.39	0.38	0.36	0.34	0.36	0.35	0.33	0.31	
	1	0.52	0.51	0.49	0.38	0.43	0.42	0.40	0.38	
	0.5	0.64	0.62	0.58	0.55	0.55	0.52	0.48	0.46	

바뀌가며 입자 분리 여부를 확인한 결과, 입자 분리의 전극 크기에 따른 최대 분리율을 보여주는 전극 간 간격을 확인했다.

또한 나머지 설계변수인 유속, 입자의 직경, 입자의 유전

표 2 처리 유량(시간 당 리터)

Table 2 Flow capacity(litter per hour), blue cell is over 1000(litter per hour) while red cell is under 1000(litter per hour)

Electrode gap (mm)		55				35				
Permittivity		5	10	20	30	5	10	20	30	
Particle diameter (μm) and velocity of flow (m/s)	80	3	5133	4495	3577	2976	4763	4320	3617	3012
		2	4147	3875	3743	2654	3942	3743	3145	2627
		1	3686	3218	2782	2250	3460	2802	2434	2126
		0.5	2880	2640	2268	1937	2398	2167	1878	1663
	40	3	1478	1213	1080	914	1428	1283	1059	894
		2	1351	1107	936	794	1411	1371	1180	986
		1	1192	980	843	696	1286	1090	945	778
		0.5	1037	871	727	616	952	903	794	643
	20	3	576	376	292	259	389	376	315	270
		2	314	277	251	202	520	416	277	234
		1	404	298	254	187	412	311	260	230
		0.5	328	249	214	176	338	281	234	198
10	3	125	118	111	104	164	125	118	104	
	2	99	93	83	78	115	110	104	88	
	1	80	73	64	58	101	101	86	80	
	0.5	74	67	61	49	93	86	74	63	
Electrode gap (mm)		27.5				16.43				
Permittivity		5	10	20	30	5	10	20	30	
Particle diameter (μm) and velocity of flow (m/s)	80	3	3308	3195	2730	2271	1825	1715	1504	1283
		2	2880	2766	2333	1984	1514	1472	1255	1089
		1	2304	2039	1774	1498	1141	933	899	757
		0.5	1620	1401	1274	1116	794	657	643	564
	40	3	1146	975	817	709	744	709	640	514
		2	1072	936	779	734	609	596	520	438
		1	922	799	676	581	545	476	397	339
		0.5	684	609	570	427	378	358	304	264
	20	3	485	327	281	249	259	239	209	182
		2	427	295	234	210	226	210	187	166
		1	339	248	208	187	181	171	147	125
		0.5	264	226	184	156	156	149	124	107
10	3	132	118	118	104	118	111	97	91	
	2	110	104	93	83	93	88	78	69	
	1	97	94	86	52	67	64	58	52	
	0.5	74	69	67	54	54	49	41	38	

율을 변화해가며 최대분리율을 확인했다. 입자들은 유속이 작을 때 더 오랜시간 유전영동력을 받아 분리율이 올라간다. 또한 유전영동력 계산식에 의하면 입자의 직경이 클 때 유전영동력이 크다.

마지막으로, 입자의 유전을 역시 Clausius-Mossotti factor K 에 의해 입자의 유전율이 작을 때, 즉 액체와 입자의 유전율의 차이가 클 때 유전영동력이 크게 된다. 유속이 0.5, 1, 2, 3 m/s 인 경우, 입자의 직경이 10, 20, 40, 80 μm 인 경우, 그리고 입자의 유전율이 5, 10, 20, 30 인 경우에서의 입자 분리율을 수치해석을 통해 확인했다. 입자분리율은 표 1에, 그리고 표 1을 입자 처리유량으로 변환하여 표 2에 나타내었다.

표 1을 통해 입자분리율을 확인하면, 전극간격이 크고 입자의 유전율이 작으며 입자의 크기가 클 때 입자분리율이 커짐을 확인할 수 있다. 그리고 유속 역시 작아야 입자 분리

율이 큼을 알 수 있다. 그렇지만 표 2의 처리유량을 통해 다른 설계 변수가 같은 조건에서 유속은 반대로 커야 처리 유량을 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

유동 액체 속 미세입자의 운동은 유전영동력, 항력, 부력 그리고 중력을 고려해야 하는 다중물리시스템이다. 이러한 시스템을 해석하기 위해 유한요소법으로 전기장과 유체장의 분포를 구하고, 이를 통해 계산한 특정 위치에서 입자에 작용하는 힘을 바탕으로 Runge-Kutta 기법을 통해 입자의 움직임을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 해석 기법을 바탕으로 유동액체 속 미세입자 분리를 설계 하고 그 유효성을 확인했다. 입자분리의 전극크기/간격, 유속, 입자의 크기, 입자의 유전율을 설계변수로 하여 유로길이를 고정 후 입자거동특성을 해석한 결과, 전극의 크기/간격이 넓고, 유속이 낮으며, 입자의 크기가 크고, 입자의 유전율이 작을 때 입자분리율이 더 높아짐을 알 수 있었다.

자연적으로 발생하는 미세입자의 대부분이 유전체임을 고려하면 유전영동력을 이용한 미세입자 제어기술을 요구하는 분야는 지금보다 넓어질 것이다. 또한 유전영동력을 이용하는 미세입자 분리장치의 경우 설계가 간단하고 전류가 흐르지 않아 효율 또한 매우 높다. 향후 최적설계와 실험을 통해 설계모델의 실효성 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업(No. 2014000110012)과 한국에너지기술평가원의 에너지인력양성사업(No. 20164030200980)의 지원에 의하여 수행한 성과입니다.

References

- [1] M. Kersaudy-Kerhoas, R. Dhariwal, and M. P. Y. Desmulliez, "Recent advances in microparticle continuous separation", *IET Nanobiotechnology*, vol. 2, iss. 1, pp. 1-13, 2008.
- [2] C. I. Calle, et al., "Dust Particle Removal by Electrostatic and Dielectrophoretic Forces with Applications to NASA Exploration Missions," *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, pp. 1-14, 2008.
- [3] S. H. Ha, B. S. Park, S. G. Hong, M. K. Baek, and I. H. Park, "Analysis and Experiment for Microparticle Separation System Using Traveling Electric Field and Dielectrophoresis," presented at HKICEAS 2016, Hong Kong, China, Dec. 16-18, 2015.
- [4] A. S. Biris, et al, "Electrodynamic removal of contaminant particles and its applications", *Industry Applications Conference*, vol. 2, pp. 1283-1286, 2004.

- [5] Y. Oda, et al, "Development of Dust Removal System for Fusion Reactor", *Journal of Fusion Energy*, vol. 16, no. 3, pp. 231-236, 1997.

저 자 소 개



정 한 백(Chung Han-Baek)

2015년 성균관대학교 전자전기공학부 졸업, 2015년~2017년 동 대학원 전자전기공학부 졸업, 공학석사



서 경 식(Seo Kyung-Sik)

2013년 성균관대학교 전자전기공학부 졸업, 2013년 ~ 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정



최 찬 영(Choi Chan-Young)

2012년 성균관대학교 전자전기공학부 졸업, 2014년 ~ 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석박과정



박 일 한(Park Il-Han)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업, 공학박사, 1991년 ~ 1992년 프랑스 그레노블 공대 post-doc, 1993년 ~ 1998년 숭실대학교 공대 전기공학과 교수, 2011년 ~ 현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수