

유수분리를 위한 3D 프린팅 기술 기반의 마이크로하이드로사이클론

김주완 · 김원진 · 박 승 · 박채리 · 유정흠 · 지인서 · 강전웅 · 김태영 · 홍지우[†]

충실대학교 기계공학부
06978 서울시 동작구 상도로 369
(2021년 11월 12일 접수, 2021년 12월 1일 수정본 접수, 2021년 12월 14일 채택)

3D-Printed Microhydrocyclone for Oil/Water Separation

Joowan Kim, Won Jin Kim, Seung Park, Cherry Park, Jung Heum Yoo, Inseo Ji, Jeon-Woong Kang,
Taeyung Kim and Jiwoo Hong[†]

School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea
(Received 12 November 2021; Received in revised form 1 December 2021; Accepted 14 December 2021)

요 약

생활 폐수나 산업 폐수에 포함된 오일이나 해양 유출유 등은 수질오염 및 생태계 파괴 등의 심각한 환경오염 문제를 야기하고 있다. 대표적인 유수분리기술인 필터(또는 멤브레인)를 사용하는 경우에 분리막의 파울링, 낮은 처리용량 등의 기술적 제약이 있다. 본 연구에서는 원심력을 이용하여 유체내의 입자상 물질이나 밀도가 다른 액체-액체 혼합물을 분리하는 장치인 하이드로사이클론의 장점을 활용하며, 동시에 분리 효율을 증대시키기 위하여 고해상도의 3D 프린팅 기술을 도입하여 스케일 다운된 마이크로하이드로사이클론을 제작하였다. 본 연구에서 개발한 마이크로하이드로사이클론을 통해 탈이온수와 올리브유로 이루어져 있는 수중유상 에멀전을 효과적으로 분리할 수 있음을 증명하였다.

Abstract – Oil contained in domestic and industrial wastewater or marine spilled oil gives rise to severe environmental pollution issues such as water pollution and ecosystem destruction. The membrane filtration method as one of representative oil/water separation strategies has technological challenges such as membrane fouling and low separation rate. In this work, we devise a 3D-printed microhydrocyclone for oil/water separation by utilizing a digital lighting processing-based 3D printer. We demonstrate that the 3D-printed microhydrocyclone can effectively separate oil and water phases from oil-in-water emulsion.

Key words: 3D-printing technology, Microhydrocyclone, Oil/water separation, Oil-in-water emulsion

1. 서 론

우리 일상 생활 및 산업체로부터 배출된 폐수에 포함된 오일(절삭유, 열처리유, 세척유, 식물유 등)이나 해양 유출유 등은 수질오염 및 생태계 파괴 등의 심각한 환경오염 문제를 야기하고 있다[1-4]. 이러한 산업 폐수를 유수분리기술을 통해 분리하여 분리된 오일이나 물을 회수 및 재활용한다면, 공정 운영 비용의 절감과 함께 환경오염 문제를 줄일 수 있다. 이를 위해 유착기, 필터(또는 멤브레인), 화학처리 기술 등의 다양한 유수분리기술(또는 장치)들이 개발되고 있고, 다양한 산업 분야에 적용되고 있으나, i) 분리막의 파울링 문제, ii) 복잡한 고비용의 처리 장비 필요, iii) 운영 및 유지에 대한 고비용

발생 등의 문제를 가지고 있다[5].

하이드로사이클론(hydrocyclone, HC)은 원심력을 이용하여 유체 내의 입자상 물질이나 밀도가 다른 액체-액체(또는 고체-고체, 기체-고체) 혼합물을 분리하는 장치로, 설치가 간단하고, 설치비용이 저렴하며, 움직이는 부품이 없는 간단한 구조로 높은 작동 신뢰성을 가진다[6]. 이러한 하이드로사이클론의 장점들로 인해, 습식분급(폐회로밀, 연마제, 분말제조), 고액분리 및 농축, 화학공정 불순물 제거, 토양 오염 정화 등의 다양한 산업 분야에 적용되고 있다[7-14]. 이러한 하이드로사이클론의 장점 및 범용적 응용성에도 불구하고, 매크로 스케일의 하이드로사이클론은 분리 효율이 높지 못하다는 심각한 단점을 가지고 있다. 하이드로사이클론의 분리 효율은 하이드로사이클론의 전체 크기에 크게 의존하므로 하이드로사이클론의 크기를 줄이게 된다면 분리 효율을 향상시킬 수 있다[6,15].

하이드로사이클론의 분리 효율을 증가시키기 위해 미세가공(microfabrication)이나 3D 프린팅 기술(3D printing technology)을 도입하여 스케일 다운(scale-down)된 마이크로하이드로사이클론

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jiwoohong@ssu.ac.kr

‡ 이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(microhydrocyclone, μ HC)을 개발한 연구들이 보고되고 있다. Bhardwaj와 연구진은 포토리소그래피(photolithography)와 마이크로 밀링(micro-milling)기술을 통해 폴리메틸 메타크릴레이트 기반의 μ HC를 처음으로 제작하였고, 이 μ HC를 이용하여 수십 μ m 크기의 마이크로 비드를 분리하는데 성공하였다[16]. Syed와 연구진은 멀티젯(multi-jet modelling)방식의 3D 프린팅 기술을 통해 최초로 3D 프린팅된 μ HC를 제작하였으며, 이를 이용하여 미세조류(microalgae)를 분리 및 농축(약 7배)하는데 성공하였다[17]. 아주 최근에는, 스테레오 리소그래피(stereo lithography apparatus)방식과 마스크 투영 이미지 경화(digital lighting processing, DLP)방식을 결합한 고해상도의 3차원 프린팅 기술을 이용하여 250 μ m크기의 입구 직경을 갖는 μ HC를 제작하는데 성공하였다[18]. 또한, 이를 통해 40 mL/min의 유속에서 3.7 μ m 크기의 마이크로입자를 분리하는데 성공하였다. 하지만, 앞서 기술한 대부분의 선행 연구들은 입자의 분리 및 농축을 위한 연구에 국한되어 있으며, 본 연구진이 조사한 바로는 유수 분리(또는 액체-액체 분리)를 위한 3D 프린팅된 μ HC에 대한 연구는 보고된 바 없었다.

본 연구에서는 DLP방식의 고해상도 3D 프린터를 이용하여 μ HC를 제작하여, 유수분리 성능평가를 수행하였다. 초고속카메라를 통해 μ HC내부에 발생하는 선회유동(vortex flow)을 관찰하였으며, 수치

해석을 통해 다른 유입 유량 조건에서 μ HC내부의 유동장 변화를 예측하였다. 최종적으로, 본 연구에서 제작한 μ HC를 통해 탈이온수(D.I. water)와 올리브유로 이루어져 있는 수중유상 에멀전의 유수분리 가능성을 검증하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 유수분리를 위한 3D 프린팅 기술 기반의 μ HC에 대한 설계도, 개념도 및 실험장치 구성도를 보여주고 있다(Fig. 1). 3D 프린팅으로 μ HC를 제작하기 위해서 먼저 3D CAD 상용프로그램인 Solidworks을 이용하여 μ HC를 모델링하였다(Fig. 1(a)). 본 연구에서는 이중 입구를 갖는 μ HC이 단일 입구를 갖는 μ HC보다 보다 높은 분리 효율과 고처리량 성능을 보인다는 선행 연구 결과[19]를 기반으로 이중 입구를 갖는 μ HC를 설계하였다. 실험에 사용한 μ HC의 치수는 다음과 같다. 수중유상 에멀전이 유입되는 입구(inlet)의 직경, 상부유동(overflow) 및 하부유동(underflow)가 빠져나가는 출구(outlet)의 직경은 각각 0.71 mm, 0.75 mm, 1.00 mm로 설계하였다. μ HC의 상단부의 원기둥의 내경은 5 mm로, 하단부 원추형 구조의 원뿔각(cone angle)은 5.93°로 설계하였다.

3D CAD 프로그램을 통해서 모델링한 μ HC를 DLP방식의 3D

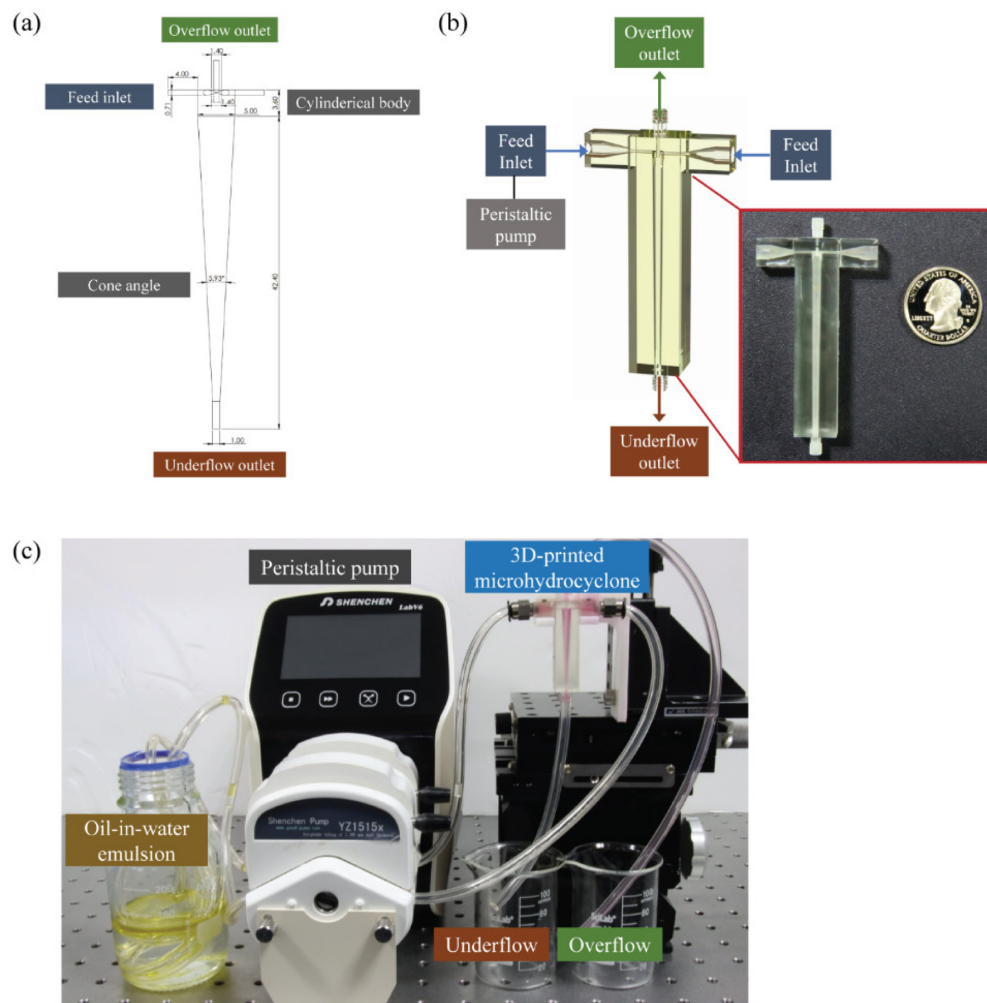


Fig. 1. (a) A computer-aided design, (b) conceptual diagrams, and (c) configuration of experimental apparatus for 3D-printed microhydrocyclone (μ HC).

printer(Max X27, Asiga, Australia)를 사용하여 출력하였다. 여기서, DLP방식은 액상 광경화성 수지에 빔프로젝터를 이용하여 조형하고자 하는 형태에 맞춰 UV광원을 투사하고, 그 투사한 모양대로 수지를 경화시켜서 적층하는 방식의 3D 프린팅 기법이다. 출력된 μ HC 내부의 잔존하는 광경화성 수지들을 제거하기 위해 아이소프로판올과 초음파세척기를 이용하여 μ HC를 세척하였다.

수중유상 에멀전을 제조하기 위해 수상으로는 탈이온수(D.I. water, Merck, Germany)와 올리브유를 사용했다. 상온에서 탈이온수와 올리브유의 밀도는 각각 998 kg/m^3 와 918 kg/m^3 이다. 탈이온수 100 mL와 올리브유 11 mL를 비이커에 채운 후 초음파세척기를 통해 수중유상 에멀전을 제조하였다. 최대한 동일한 상태의 수중유상 에멀전을 제조하기 위해 초음파세척기의 가동 시간을 고정하여 반복 제조하였다.

제조한 수중유상 에멀전을 높은 유량으로 μ HC내부로 주입하기 위하여 μ HC 연동 펌프(peristaltic pump, Shenheng, China)를 사용하였으며, 주입된 체적 유량과 μ HC 분리 효율 간의 상관 관계를 파악하기 위하여 200 mL/min, 600 mL/min, 1000 mL/min, 1400 mL/min의 다른 체적 유량 조건에서 유수분리 실험을 진행하였다. 고속 유량 조건에서의 튜빙과 μ HC 입/출구 연결부에서의 누수나 누유를 방지하기 위하여, i) 입구 연결부는 원터칭 피팅 방법을 통해, ii) 출구 연결부는 악어 이빨형태의 미세구조물을 포함한 출구 형태를 제작함으로써 튜빙과 μ HC 입/출구를 견고하게 연결하였다. 한편, 수중유상 에멀전을 균일하게 μ HC내부로 주입하기 위하여 실험을 진행하는 동안에는 마그네틱 교반기를 통해 용기내에 담긴 수중유상 에멀전을 고르게 분산시켜주었다.

μ HC내부에 발생하는 고속의 선회유동(vortex flow)을 관찰하기 위하여 매크로 렌즈를 연결한 초고속 카메라(Fastcam Mini UX100,

Photron, JAPAN), 확산판(diffuser plate), 광원(1kW의 LED light)으로 구성된 유동가시화 시스템을 구축하였다. 선회유동의 고속 이미지를 획득하기 위하여 4,000 fps이상으로 고속 촬영하였다.

끝으로, μ HC를 통해 분리된 유상과 수상의 체적을 측정하여 μ HC의 분리 효율을 계산하였다. 본 연구에서의 모든 실험은 최소 3회 이상 반복 실험하였으며, 이에 대한 평균값과 표준 오차를 그래프에 표시하였다.

3. 수치해석 모델 개발

유한요소법(finite element method)기반의 상용프로그램인 COMSOL Multiphysics (v5.5, COMSOL Multiphysics Inc., USA)을 이용하여 μ HC내부의 유동장을 해석 및 예측하기 위한 수치해석 모델을 개발하였다. 본 수치해석적 연구에서는 유/수상의 분리 효율 예측보다 주입 유량에 따른 선회유동의 특성을 파악하는데 집중하고자 유/수상의 다상유동을 고려하지 않고 μ HC내부의 단일 상(수상)의 유동만 고려하였다. 3차원 정상상태 및 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식을 해석하여 채널 내부 유동장 분포를 구하였다. 유체의 물성은 상온에서의 물의 물성치(밀도: 998.2 kg/m^3 , 점도: 1.0093 cP)를 사용하였으며, 초기 조건(initial condition)으로 각각 정지유속($u_{\text{initial}}=0$)과 대기압($p_{\text{initial}}=0$)조건을 부여하였다. 경계조건(boundary condition)으로는 μ HC의 입구에서는 실험과 동일한 조건의 총 유입 유량(200 mL/min, 600 mL/min, 1000 mL/min, 1400 mL/min; 두 입구의 유량 비=1:1)을 부여하였으며, 출구에서는 열린 경계조건(open boundary condition)을 부여하였다. 끝으로, μ HC 벽면에서의 경계조건은 미끄럼 방지 조건(no-slip condition)을 사용하였다.

본 수치해석 모델은 551,808개의 육면체(hexahedra) 형태의 격자

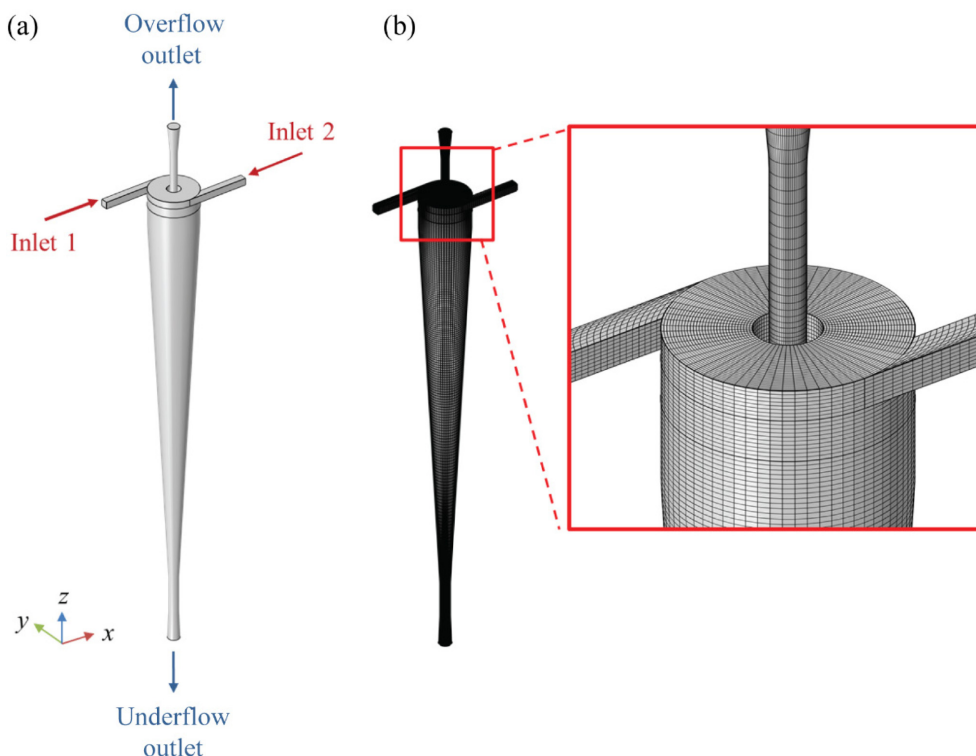


Fig. 2. Description of the numerical model for flow field analysis inside the μ HC; (a) calculation domain and (b) mesh distribution of the numerical model. The inset of Fig. 2(b) indicates magnification of the fine meshes used in the numerical model.

(mesh)로 구성되어 있으며, 격자 정점(mesh vertices)의 수는 564,157이다. Navier-Stokes 방정식의 종속변수 유속(u), 압력(p)은 선형변수로 정상상태 해석을 진행하였다. 정상상태 유동장 해석의 자유도(number of degrees of freedom)은 2,256,628이다.

4. 결과 및 고찰

하이드로사이클론의 입구에 접선 방향으로 밀도가 다른 유체를 주입하게 되면, 접선 속도에 의해 사이클론의 내부에 선회류가 생기고 높은 밀도를 갖는 유체는 원심력에 의해 측벽으로 이동하게 된다. 이 유체는 결국에 중력과 관성력에 의해 회전하면서 아래로 하강하여 하부유동 출구(underflow outlet)로 배출된다. 이러한 선회류를 외부 선회류(outer vortex flow)라고 한다. 하이드로사이클론의 중심부에서는 원주부에서 유체 저항의 증가로 반대 방향의 선회류를 형성하며 낮은 밀도를 갖는 유체는 이 내부 선회류(inner vortex flow)를 따라 상부유동 출구(overflow outlet)로 배출된다. 즉, 하이드로사이클론의 분리 성능은 이러한 선회류의 형성과 밀접하게 연결되어있다. 본 연구에서는 초고속카메라 기반의 유동가시화 시스템과 3D 프린터로 출력된 μ HC의 표면 후처리 공정을 통해 μ HC내부에서의 선회류 형성을 가시화하는데 성공하였다(Fig. 3).

μ HC의 형상, 유체 물성, 공정변수 등의 변화에 따른 분리 성능 및 동력비를 예측하기 위해서는 μ HC의 유동장(속도 및 압력) 분포에 대한 정보가 기본적으로 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 작동유체의 주입 유량에 따른 μ HC 내부의 속도장 및 압력장 분포의 변화에 대한 수치해석을 수행하였다(Fig. 4). 3절의 ‘수치해석 모델 개발’부분에서 언급하였듯이 본 연구에서는 유/수상의 다상유동을 고려하지 않고 μ HC내부의 단일 상(수상)의 유동만 고려하였다. Fig. 4(a)와 (b)에서 보듯이, 주입 유량에 상관없이 거의 유사한 유동장 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 주입 유량이 증가함에 따라 상부유동 출구에서의 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 3차원 유선 패턴(streamline pattern)에서도 확인할 수 있듯이(Fig. 4(e)), 주입 유량이 증가할수록 높은 상승기류가 형성되기 때문이라고 추측할 수 있다. 한편, 주입 유량에 상관없이 모두 입구 영역에서 가장 높은 압력을 나타내고, 출구에 도달할수록 압력이 점차 낮아져 출구에서 가장 낮은 압력을 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 출구에서 가장 낮은 압력이 나타나는 원인은 유체 점성의 영향을 배제하면 베르누이 방정식에 따라서

유속과 정압은 반비례의 관계를 갖기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 주입 유량이 증가할수록 μ HC의 중심부와 출구 간의 압력 강하가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 압력 강하는 하이드로사이클론 운전시 분리 성능 뿐만 아니라 동력비를 결정하는 주요 인자로 작용한다. 향후 유/수상의 다상유동을 고려한 수치해석 모델을 개발하여, μ HC에 대한 분리 성능을 극대화 할 수 있는 최적의 형상 및 공정변수 조건들을 도출할 계획이다.

다른 주입 유량 조건(200 mL/min, 600 mL/min, 1000mL/min, 1400 mL/min)에서 탈이온수와 올리브유로 구성되어 있는 수중유상 에멀전을 μ HC를 통해 유수 분리한 후 분리 효율을 측정하였다. 예상과 다르게 저속의 유량 조건(200 mL/min)에서 가장 높은 분리 효율(약 93.9%)을 보임을 확인하였다. 그리고, 나머지 유량 조건에서는 유속에 관계없이 약 50%의 분리 효율을 보였다. 이는 고속의 유량 조건의 경우 μ HC 내부에 선회유동이 발생하기 전에 이미 상하부의 출구로 작동유체가 빠져나가는 것이 원인으로 사료된다. 향후 μ HC의 용량(스케일) 및 주입 유량 조건과 분리 성능 간의 정량적인 관계에 대한 보다 시스템학적인 연구를 수행할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 하이드로사이클론의 유수 분리 성능을 향상시키고자 고해상도의 3D 프린팅 기술을 도입하여 스케일 다운된 마이크로 하이드로사이클론(μ HC)을 제작하였다. 우선, 초고속이미징시스템을 도입하여 본 연구에서 고안된 μ HC내부에 선회유동이 생성되는 조건을 확인하였다. 또한, 수치해석 모델 개발을 통해 주입 유량에 따른 μ HC내부의 유동장 변화를 예측할 수 있었다. 끝으로, 다른 주입 유량 조건에서 탈이온수와 올리브유로 구성되어 있는 수중유상 에멀전을 μ HC를 통해 유수 분리한 후 분리 효율을 측정하여 저속의 유량 조건(200 mL/min)의 경우에 약 93.9%의 높은 분리 효율을 보임을 확인하였다. 향후 μ HC의 용량(스케일), 주입 유량 조건, 유수상의 물성 조건 등과 분리 성능 간의 정량적인 관계에 대한 보다 시스템학적인 연구를 수행할 계획이다. 분리 처리용량 증대를 위하여 병렬화된 μ HC시스템 개발에 대한 연구 또한 진행할 계획이다. 이러한 연구들은 산업용 폐수에 포함된 오일 제거를 통해 폐수 처리 비용 절감 및 폐수로 인한 환경문제를 해결하는 데 있어 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

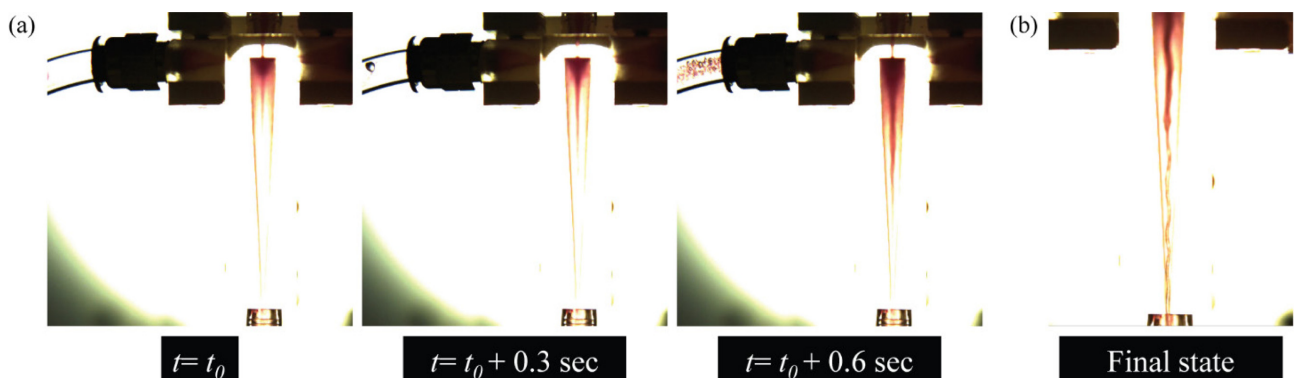


Fig. 3. (a) Transient formation process of the inner vortex flow inside the μ HC and (b) a magnified image of the inner vortex flow.

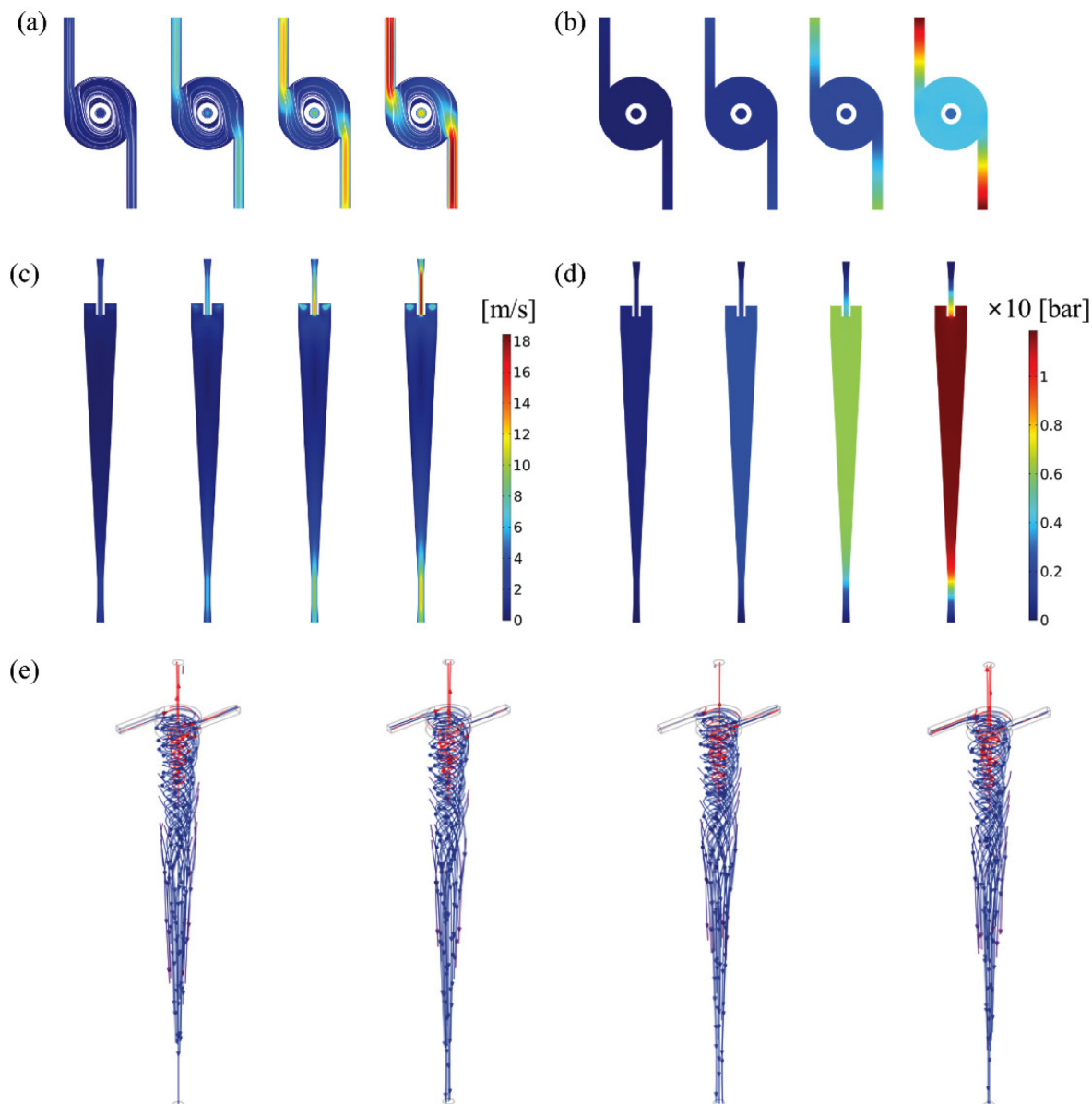


Fig. 4. Numerical predictions of velocity and pressure fields inside the μ HC. The distributions of velocity and pressure amplitudes in the xy plane are depicted in (a) and (b), respectively. (c) and (d) depict the velocity and pressure amplitude distributions in the yz plane, respectively. (e) illustrates the 3D streamline patterns for the swirling flow inside the μ HC. The total infusion flow rate increases from the left column to the right column in all figures.

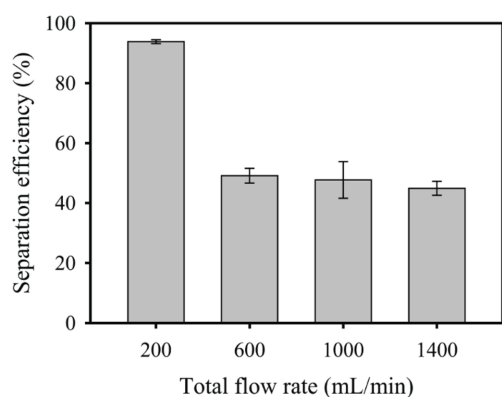


Fig. 5. Separation performance with the oil-in-water emulsion as a function of the total infusion flow rate into the μ HC.

감 사

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1F1A1066664). 또한, 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국과학창의재단(2021년도 학부생 연구프로그램)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J. and Mayes, A. M., "Science and Technology for Water Purification in the Coming Decades," *Nature*, **452**(7185), 301-310(2008).

2. Yuan, J., Liu, X., Akbulut, O., Hu, J., Suib, S. L., Kong, J. and Stellacci, F., "Superwetting Nanowire Membranes for Selective Absorption," *Nat. Nanotechnol.*, **3**(6), 332-336(2008).
3. Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L. and Hassell, D. G., "A Review on Anaerobic-aerobic Treatment of Industrial and Municipal Wastewater," *Chem. Eng. J.*, **155**(1-2), 1-18(2009).
4. Singh, V., Purkait, M. K. and Das, C., "Cross-flow Microfiltration of Industrial Oily Wastewater: Experimental and Theoretical Consideration," *Sep. Sci. Technol.*, **46**(8), 1213-1223(2011).
5. Zhang, W., Liu, N., Cao, Y., Lin, X., Liu, Y. and Feng, L., "Superwetting Porous Materials for Wastewater Treatment: from Immiscible Oil/water Mixture to Emulsion Separation," *Adv. Mater. Interfaces*, **4**(10), 1600029(2017).
6. Bradley, D., *The Hydrocyclone*, Pergamon Press, Oxford(1965).
7. Young, G. A. B., Wakley, W. D., Taggart, D. L., Andrews, S. L. and Worrell, J. R., "Oil-water Separation Using Hydrocyclones: An Experimental Search for Optimum Dimensions," *J. Pet. Sci. Eng.*, **11**(1), 37-50(1994).
8. Klima, M. S. and Kim, B. H., "Dense-medium Separation of heavy-metal Particles from Soil Using a Wide-angle Hydrocyclone," *J. Environ. Sci. Health Part A*, **33**(7), 1325-1340(1998).
9. Patil, D. D. and Rao, T. C., "Classification Evaluation of Water Injected Hydrocyclone," *Miner. Eng.*, **12**(12), 1527-1532(1999).
10. Xu, P., Wu, Z., Mujumdar, A. S. and Yu, B., "Innovative Hydrocyclone Inlet Designs to Reduce Erosion-induced Wear in Mineral Dewatering Processes," *Dry. Technol.*, **27**(2), 201-211(2009).
11. Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S. and Abidin, Z. Z., "Review of Technologies for Oil and Gas Produced Water Treatment," *J. Hazard. Mater.*, **170**(2-3), 530-551(2009).
12. Oats, W. J., Ozdemir, O. and Nguyen, A. V., "Effect of Mechanical and Chemical Clay Removals by Hydrocyclone and Dispersants on Coal Flotation," *Miner. Eng.*, **23**(5), 413-419(2010).
13. Tsolaki, E. and Diamadopoulos, E., "Technologies for Ballast Water Treatment: A Review," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **85**(1), 19-32(2010).
14. Li, J. P., Yang, X. J., Ma, L., Yang, Q., Zhang, Y. H., Bai, Z. S., Fang, X. C., Li, L. Q., Gao, Y. and Wang, H. L., "The Enhancement on the Waste Management of Spent Hydrotreating Catalysts for Residue Oil by a Hydrothermal-hydrocyclone Process," *Catal. Today*, **271**, 163-171(2016).
15. Wang, B. and Yu, A. B., "Numerical Study of Particle-fluid Flow in Hydrocyclones with Different Body Dimensions," *Miner. Eng.*, **19**(10), 1022-1033(2006).
16. Bhardwaj, P., Bagdi, P. and Sen, A. K., "Microfluidic Device Based on a Micro-hydrocyclone for Particle-liquid Separation," *Lab Chip*, **11**(23), 4012-4021(2011).
17. Syed, M. S., Rafeie, M., Henderson, R., Vandamme, D., Asadnia, M. and Warkiani, M. E., "A 3D-printed Mini-hydrocyclone for High Throughput Particle Separation: Application to Primary Harvesting of Microalgae," *Lab Chip*, **17**(14), 2459-2469(2017).
18. Han, J. Y., Krasniqi, B., Kim, J., Keckley, M. and DeVoe, D. L., "Miniaturization of Hydrocyclones by High-Resolution 3D Printing for Rapid Microparticle Separation," *Adv. Mater. Technol.*, **5**(4), 1901105(2020).
19. Young, G. A. B., Wakley, W. D., Taggart, D. L., Andrews, S. L. and Worrell, J. R., "Oil-water Separation Using Hydrocyclones: An Experimental Search for Optimum Dimensions," *J. Pet. Sci. Eng.*, **11**(1), 37-50(1994).

Authors

Joowan Kim: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; kjo7863@gmail.com

Wonjin Kim: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; jin-sair98@gmail.com

Seung Park: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; scv8640@gmail.com

Cherry Park: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; cherrypark862@gmail.com

Jungheum Yoo: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; ugesa1009@gmail.com

Inseo Ji: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; inseotropy@gmail.com

Jeonwoong Kang: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; kangjw159@gmail.com

Taeyung Kim: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; rlaxodudsla@gmail.com

Jiwoo Hong: Professor, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; jiwoohong@ssu.ac.kr