(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0019022
(43) 공개일자 2025년02월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B01D 21/00 (2006.01) *B01D 21/26* (2006.01)
(52) CPC특허분류
B01D 21/0087 (2013.01)
B01D 21/265 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-7037061
(22) 출원일자(국제) 2023년05월31일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2024년11월06일
(86) 국제출원번호 PCT/US2023/024006
(87) 국제공개번호 WO 2023/235396
국제공개일자 2023년12월07일
(30) 우선권주장
63/347,915 2022년06월01일 미국(US)

(71) 출원인
도널드선 컴파니 인코포레이티드
미합중국 미네소타 55431 블루밍턴 웨스트 94번가 1400
(72) 발명자
넬슨 제이콥 에이
미국 55431 미네소타 블루밍턴 웨스트 94번가 1400
모라벡 데이비스 비
미국 55431 미네소타 블루밍턴 웨스트 94번가 1400
(74) 대리인
(유)한양특허법인

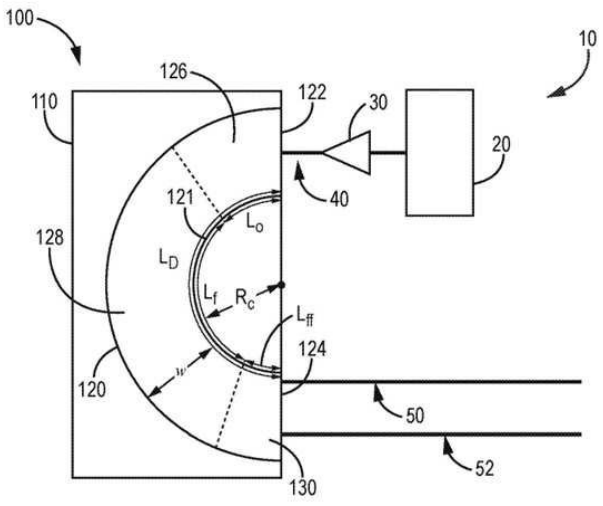
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **테이퍼형 미세유체 채널을 갖는 유체역학적 분리기**

(57) 요 약

본 발명에 개시된 기술은 유체역학적 분리기에 관한 것이다. 유체역학적 분리기는 직경을 갖는 분산 입자를 갖는 액체를 분리하도록 구성될 수 있다. 유체역학적 분리기는 기판과 상기 기판에 의해 적어도 부분적으로 정의되는 액체 채널을 갖는다. 액체 채널은 채널 내에서 액체를 수용하도록 구성된다. 액체 채널은 입구와 출구를 포함한다. 출구는 제1 출구 분기와 제2 출구 분기를 포함한다. 액체 채널은 중심 축을 중심으로 내부 반경을 정의하는 내벽과 중심 축을 중심으로 외부 반경을 정의하는 외벽을 포함한다. 액체 채널은 입구에서 출구까지 내벽을 따라 액체 채널 길이를 갖는다. 액체 채널은 내벽과 외벽 사이에 채널 폭을 가지며, 채널은 출구로 갈수록 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역을 포함한다.

대 표 도 - 도1



명 세 서

청구범위

청구항 1

기판; 및

채널 내에 액체를 수용하도록 구성되고, 제1 출구 분기 및 제2 출구 분기를 포함하는 입구 및 출구를 가지며, 상기 기판에 의해 적어도 부분적으로 정의된 액체 채널;을 포함하고,

상기 액체 채널은 중심 축을 중심으로 내부 반경을 정의하는 내벽과 상기 중심 축을 중심으로 외부 반경을 정의하는 외벽을 포함하고,

상기 액체 채널은 상기 내벽을 따라 상기 입구에서 상기 출구까지의 액체 채널 길이를 포함하고,

상기 액체 채널은 상기 내벽과 상기 외벽 사이에 채널 폭을 포함하고, 상기 채널은 상기 출구 쪽으로 상기 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역(tapered region)을 포함하는 것을 특징으로 하는, 직경(a)를 갖는 분산 입자를 갖는 유체를 분리하도록 구성된 유체역학적 분리기.

청구항 2

제1항 및 제3항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 테이퍼 영역은 상기 입구에서 상기 출구까지 연장되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 3

제1항 내지 제2항 및 제4항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 내부 반경은 상기 입구에서 상기 출구까지 일정한 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 4

제1항 내지 제3항 및 제5항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 외부 반경은 상기 입구와 상기 출구 사이에서 바깥쪽으로 테이퍼되는(tapers) 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 5

제1항 내지 제4항 및 제6항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 제1 채널 폭 및 제1 액체 채널 길이를 갖는 제1 영역, 제2 채널 폭 및 제2 액체 채널 길이를 갖는 제2 영역, 및 상기 제1 영역에서 상기 제2 영역으로 연장되는 테이퍼 영역 길이를 갖는 상기 테이퍼 영역을 포함하는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 6

제1항 내지 제5항 및 제7항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 제1 영역이 상기 제2 영역보다 더 긴 길이를 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 7

제1항 내지 제6항 및 제8항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 유체역학적 분리기는 상기 제1 영역 및 상기 제2 영역에서 5 내지 25 사이의 딘 번호(Dean number, De)를 갖도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 8

제1항 내지 제7항 및 제9항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 입자 직경(a)이 적어도 상기 제1 영역에서 유압 직경(D_H)의 8%보다 큰 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 9

제1항 내지 제8항 및 제10항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 유체역학적 분리기는 상기 액체보다 최대 3배 밀도의 입자를 분리하도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 10

제1항 내지 제9항 및 제11항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 내부 반경은 10 ㎜ 이상 100 ㎜ 이하인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 11

제1항 내지 제10항 및 제12항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 상기 기판에 의해 정의된 복수의 동일한 액체 채널 중 하나인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 12

제1항 내지 제11항 및 제13항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 400 ㎛ 내지 1000 ㎛ 범위인 폭을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 13

제1항 내지 제12항 및 제14항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 100 ㎛ 내지 500 ㎛ 범위인 높이를 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 14

제1항 내지 제13항 및 제15항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 상기 액체 채널 길이를 따라 다각형 단면을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 15

제1항 내지 제14항 및 제16항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 상기 액체 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 16

제1항 내지 제15항 및 제17항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널의 상기 채널 폭은 상기 액체 채널을 따라 1 ㎜ 액체 채널 길이당 10 ㎜를 넘지 않게 변하는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 17

제1항 내지 제16항 및 제18항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 채널 폭은 상기 테이퍼 영역에서 일정한 비율로 증가하는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 18

제1항 내지 제17항 및 제19항 내지 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 제1 채널 폭을 갖는 제1 영역과 상기 제1 영역에서 상기 출구까지 증가하는 채널 폭을 갖는 테이퍼 영역을 포함하는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 19

제1항 내지 제18 항 및 제20항 중 어느 하나에 있어서,

상기 액체 채널은 복수의 테이퍼 영역을 포함하고, 상기 테이퍼 영역 각각은 상기 출구를 향해 증가하는 채널 폭을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

청구항 20

제1항 내지 제19항 중 어느 하나에 있어서,

상기 유체 채널이 미세유체 채널인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 출원은 2022년 6월 1일에 출원된 미국 가출원 제63/347,915호에 대한 우선권을 주장하며, 이는 본 명세서에 전체적으로 참조로 포함된다.

[0002] 본 개시는 일반적으로 유체역학적 분리기에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 개시는 테이퍼형 미세유체(microfluidic) 채널을 갖는 유체역학적 분리기에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 유체역학적 분리기는 탄화수소 액체, 음료, 수용액 등과 같은 유체 흐름에서 입자의 농축 및/또는 분리를 위해 다양한 산업 분야에서 사용된다. 유체에 부유된 입자는 시스템 공정(예: 연료 또는 유압 시스템)에서 문제를 일으킬 수 있고, 일반적으로 소비자에게 바람직하지 않을 수 있으며(예: 오렌지 주스의 펄프 또는 맥주 또는 와인의 불순물), 유체와는 다른 처리 과정을 거칠 수 있다 (예: 하수 처리). 이러한 유체역학적 분리기는 에너지 소비 및 시간 측면에서 입자 분리 및 효율성을 개선하기 위해 최소한의 압력 강하로 적절한 입자 분리를 달성하도록 설계하는 것이 바람직할 수 있다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

[0004] 본 명세서에 개시된 기술의 일부 실시예는 직경 (a)의 분산된 입자를 갖는 액체를 분리하도록 구성된 유체역학적 분리기에 관한 것이다. 유체역학적 분리기는 기판을 포함한다. 유체역학적 분리기는 기판에 의해 정의된 액체 채널을 포함한다. 액체 채널은 채널 내에서 액체를 수용하도록 구성된다. 액체 채널은 입구와 출구를 포함한다. 액체 채널은 중심 축 주위의 내부 반경을 정의하는 내벽과 중심축 주위의 외부 반경을 정의하는 외벽을 포함한다. 액체 채널은 입구에서 출구까지 내벽을 따라 액체 채널 길이를 포함한다. 액체 채널은 액체 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖는다. 직사각형 단면은 내벽과 외벽 사이에 채널 폭을 포함하며, 이 채널은 채널 폭이 출구를 향해 액체 채널 길이 1 mm당 0.00 mm 내지 0.01 mm 사이의 일정한 비율로 증가하는 테이퍼(tapered) 영역을 포함한다.

[0005] 일부 이러한 실시예에서, 테이퍼 영역은 입구에서 출구까지 연장된다. 추가로 또는 대안적으로, 내부 반경은 입구에서 출구까지 일정하다. 추가로 또는 대안적으로, 외부 반경은 입구와 출구 사이에서 바깥쪽으로 테이퍼된다(tapers). 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 제1 채널 폭 및 제1 액체 채널 길이를 갖는 제1 영역, 제2 채널 폭 및 제2 액체 채널 길이를 갖는 제2 영역, 및 제1 영역에서 제2 영역으로 연장되는 테이퍼 영역 길이를 갖는 테이퍼 영역을 포함한다. 추가로 또는 대안적으로, 제1 영역은 제2 영역보다 더 긴 길이를 갖는다. 추가로 또는 대안적으로, 분리기는 제1 영역 및 제2 영역에서 5와 25 사이의 딘 수(Dean number, De)를 갖도록 구성된다. 추가로 또는 대안적으로, 입자 직경(a)은 적어도 제1 영역에서 유압 직경(D_H)의 8%보다 크다. 추가로 또는 대안적으로, 분리기는 액체보다 최대 3배 더 밀도가 높은 입자를 분리하도록 구성된다. 추가로 또는 대안적으로, 출구는 제1 출구 및 제2 출구를 포함한다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 복수의 동일한 액체 채널 중 하나이다.

[0006] 본 명세서에 개시된 기술의 일부 실시예는 유체역학적 분리기에 관한 것이다. 유체역학적 분리기는 직경(a)을 갖는 분산된 입자를 갖는 액체를 분리하도록 구성될 수 있다. 유체역학적 분리기는 기판 및 기판에 의해 적어도 부분적으로 정의된 액체 채널을 포함한다. 액체 채널은 채널 내에서 액체를 수용하도록 구성된다. 액체 채널은 입구와 출구를 포함한다. 출구는 제1 출구 지점과 제2 출구 지점을 포함한다. 액체 채널은 중심 축 주위의 내부 반경을 정의하는 내벽과 중심축 주위의 외부 반경을 정의하는 외벽을 포함한다. 액체 채널은 입구에서 출구까지 내벽을 따라 액체 채널 길이를 포함한다. 액체 채널은 내벽과 외벽 사이에 채널 폭을 갖고, 출구 쪽으로 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역을 포함한다.

[0007] 일부 이러한 실시예에서 테이퍼 영역은 입구에서 출구까지 연장된다. 추가로 또는 대안적으로, 내부 반경은 입구에서 출구까지 일정하다. 추가로 또는 대안적으로, 외부 반경은 입구와 출구 사이에서 바깥쪽으로 테이퍼된다(taper). 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 제1 채널 폭과 제1 액체 채널 길이를 갖는 제1 영역, 제2 채널 폭과 제2 액체 채널 길이를 갖는 제2 영역, 및 제1 영역에서 제2 영역으로 연장되는 테이퍼 영역 길이를 갖는 테이퍼 영역을 포함한다. 추가로 또는 대안적으로, 제1 영역은 제2 영역보다 더 긴 길이를 갖는다. 추가로 또는 대안적으로, 분리기는 제1 영역과 제2 영역에서 5와 25 사이의 딘 수(De)를 갖도록 구성된다. 추가로 또는 대안적으로, 입자 직경(a)은 적어도 제1 영역에서 유압 직경(D_H)의 8%보다 크다.

[0008] 추가로 또는 대안적으로, 분리기는 액체보다 최대 3배 더 밀도가 높은 입자를 분리하도록 구성된다. 추가로 또는 대안적으로, 내부 반경은 10 mm 이상 100 mm 이하이다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 기판에 의해 정의된 복수의 동일한 액체 채널 중 하나이다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 400 μm 내지 1000 μm 범위의 폭을 갖는다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 100 μm 내지 500 μm 범위의 높이를 갖는다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 액체 채널 길이를 따라 다각형 단면을 갖는다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채

널은 액체 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖는다.

[0009] 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널의 채널 폭은 액체 채널을 따라 액체 채널 길이 1 ㎜당 10 ㎜를 넘지 않게 변한다. 추가로 또는 대안적으로, 채널 폭은 테이퍼 영역에서 일정한 비율로 증가한다. 추가로 또는 대안적으로, 액체 채널은 제1 채널 폭을 갖는 제1 영역 및 제1 영역에서 출구로 갈수록 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역을 포함한다. 추가로 또는 대안으로, 액체 채널은 복수의 테이퍼 영역을 포함하고, 각각은 출구를 향해 증가하는 채널 폭을 갖는다. 추가로 또는 대안으로, 액체 채널은 미세유체 채널이다.

[0010] 상기 요약은 각 실시예 또는 모든 구현을 설명하기 위한 것이 아니다. 오히려, 예시적인 실시예들에 대한 보다 완전한 이해는 첨부된 도면의 그림을 고려하여 다음의 예시적인 측면들에 대한 상세한 설명 및 청구범위를 참조함으로써 명백해지고 평가될 것이다.

도면의 간단한 설명

[0011] 도 1은 실시예와 일치하는 예시적인 유체역학적 분리기 시스템의 개략도이다.

도 2는 도 1의 액체 채널의 단면도이다.

도 3은 액체 채널의 길이를 따라 입자 집속(particle focusing)을 나타내는 그래프이다.

도 4는 액체 채널과 일치하는 다양한 딘 수(Dean numbers)에 대한 전형적인 반경 방향 유동 프로파일의 그래프이다.

도 5는 반경 방향 유동 속도를 정의하는 선행 기술 방정식에 대한 실험 결과 그래프이다.

도 6은 반경 방향 유동 속도를 정의하는 새로운 방정식에 대한 실험 결과 그래프이다.

도 7은 입자 집속 길이를 정의하는 제1방정식에 대한 실험 결과 그래프이다.

도 8은 입자 집속 길이를 정의하는 제2방정식에 대한 실험 결과의 그래프이며, 여기서 제2방정식은 입자 크기를 고려한다.

도 9는 액체 채널의 호(arc) 측정을 정의하는 제3방정식에 대한 실험 결과 그래프이다.

도 10은 나선형 액체 채널을 갖는 유체역학적 분리기의 예를 나타내는 개략도이다.

도 11은 도 10의 예시적인 유체역학적 분리기의 정면도이다.

도 12는 실시예들과 일치하는 또 다른 예시 시스템이다.

도 13은 실시예들과 일치하는 또 다른 예시 시스템이다.

본 기술은 첨부된 도면과 관련된 다양한 실시예에 대한 다음의 상세한 설명을 고려할 때 더욱 완벽하게 이해되고 평가될 수 있다.

도면들은 주로 명확성을 위해 렌더링(rendered)되며, 그 결과, 반드시 축척에 따라 그려지는 것은 아니다. 또한, 패스너(fasteners), 전기 부품(배선, 케이블 등) 등을 포함하되 이에 국한되지 않는 다양한 구조/구성 요소들은, 묘사된 실시예들의 측면들을 보다 잘 설명하기 위해 도면의 일부 또는 전체에서 도식적으로 표시되거나 제거될 수 있으며, 이는 나타낸 구현의 특정 측면을 더 잘 설명하거나, 여기서 설명된 다양한 예시 구현을 이해하는 데 그러한 구조/구성 요소의 포함이 필요하지 않은 경우이다. 그러나, 특정 도면에 그러한 구조/구성 요소에 대한 예시/설명이 없다고 해서 다양한 실시예의 범위가 어떤 식으로든 제한되는 것으로 해석되어서는 안된다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0012] 본 개시와 일치하는 유체역학적 분리기는 내부 유체 흐름으로 인한 힘에만 의존하는 유체 스트림(stream) 내의 입자를 집속(focused) 시킬 수 있는 미세유체(microfluidic) 장치이다. 입자는 유체 증기의 일부로부터 분리되거나 유체 스트림 내의 다른 크기의 입자로부터 분리될 수 있다. 유체역학적 분리기는 일반적으로 최소 두 개의 유동 분기를 갖는 입구 및 출구를 포함하는 유체 채널을 정의한다. 특정 크기 범위 내의 입자는 두 개의 유동 분기(flow branches) 중 하나로 집속되거나 모일 수 있다. 예를 들어, 임계 크기 범위를 초과하는 입자는 두 개의 유동 분기 중 하나로 집속된다. 유체 흐름의 집속된 부분은 시스템에서 제거되거나 추가 처리를 위해 유지될

수 있다. 남아 있는 입자는 최소 두 개의 유동 분기를 통해 흐를 수 있다.

[0013] 도 1은 본 명세서에 개시된 기술의 일부 구현예와 일치하는 예시적인 시스템(10)의 개략도이다. 시스템(10)은 유체 스트림에 부유하는 입자를 집속 시키도록 구성된 유체역학적 분리기 시스템이다. 시스템(10)은 입구(122) 및 출구(124)를 갖는 액체 채널(120)을 포함하는 유체역학적 분리기(100)를 포함한다. 유체 펌프(30)는 유체 공급원(20)과 유체역학적 분리기(100) 사이에 유체 전달을 형성한다. 특히, 유체 펌프(30)는 유체 공급원(20)에서 입구 유동 채널(40)을 통해 유체역학적 분리기(100)의 입구(122)로 유체를 펌핑하도록 구성된다. 유체는 유체역학적 분리기(100)의 액체 채널(120)을 통해 출구(124)로 흐르도록 구성된다. 출구(124)는 액체 채널(120)에서 다른 시스템 또는 다른 시스템 구성 요소로 이어질 수 있는 제1 출구 분기(50) 및 제2 출구 분기(52)를 포함한다. 일부 실시예에서, 제1 출구 분기(50)를 통해 흐르는 유체는 제2 출구 분기(52)를 통해 흐르는 유체에 비해 특정 크기 범위 내의 입자의 농도가 더 높도록 구성된다.

[0014] 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 유체역학적 분리기는 일반적으로 기판(110)으로 구성된다. 기판(110)은 내부에 액체 채널(120)을 적어도 부분적으로 정의한다. 기판(110)은 다양한 다른 재료 및 재료의 조합으로 구성될 수 있다. 기판은 일부 실시예에서 폴리머일 수 있다. 일부 예에서 기판은 아크릴을 포함한다. 일부 예에서 기판은 폴리카보네이트(polycarbonate)를 포함한다. 일부 예에서 기판은 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS)을 포함한다. 일부 실시예에서 기판은 유리를 포함할 수 있다. 일부 실시예에서 기판은 비반응성 금속을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서 기판은 압력 감지 접착제와 같은 하나 이상의 접착제 층을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서 기판은 두 가지 이상의 재료로 구성될 수 있으며, 따라서 채널의 벽도 두 가지 이상의 재료로 구성될 수 있다.

[0015] 액체 채널(120)은 일반적으로 액체 흐름을 수용하도록 구성된다. 액체 채널(120)은 입구(122) 및 출구(124)를 정의한다. 액체 채널(120)은 입구(122)에서 출구(124)까지의 채널 길이(L_D)를 정의한다. 액체 채널(120)은 일반적으로 중심 축(x)을 중심으로 내부 반경(R_C)을 정의하도록 곡선화된다. 따라서, 액체 채널(120)은 중심 축(x)을 중심으로 원주 방향으로 연장되어 채널 호(arc) 측정을 정의한다. 현재 예에서 액체 채널(120)은 중심 축(x)을 중심으로 약 180° 연장된다. 현재 예에서 내부 반경(R_C)은 채널 길이 전체에서 실질적으로 일정하지만 일부 다른 예에서 내부 반경(R_C)이 변할 수 있다. 일부 구현에서 내부 반경(R_C)은 5 ㎜, 10 ㎜ 또는 15 ㎜ 보다 크거나 같다. 일부 구현에서 내부 반경(R_C)은 100 ㎜, 60 ㎜, 50 ㎜ 또는 30 ㎜보다 작거나 같다.

[0016] 다양한 실시예에서, 유체역학적 분리기의 액체 채널(120)은 미세유체(microfluidic) 채널이며, 여기서 "미세유체 채널"이란 적어도 하나의 치수가 1 밀리미터(1000 마이크로미터) 미만인 채널을 의미한다. 미세유체 채널은 채널 폭이 1000 마이크로미터 미만이거나, 채널 높이(또는 깊이)가 1000 마이크로미터 미만이거나, 또는 두 가지 모두를 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 더 높은 유량 애플리케이션의 경우, 미세유체 채널의 적어도 하나의 치수는 1 밀리미터보다 클 수 있다. 일부 실시예에서, 미세유체 채널의 적어도 하나의 치수는 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 밀리미터 보다 크거나 같거나 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2밀리미터 작거나 같다. 일반적으로 채널은 적절한 입자 초점과 균형을 이루는 적절한 압력 강하를 제공하기에 적절한 길이를 가질 수 있다.

[0017] 미세유체 채널은 단면적으로 설명될 수 있다. 본 명세서에 사용된 액체 채널(120)의 단면은 일반적으로 채널(120)을 통한 유체 흐름 방향에 수직이다. 일부 실시예에서, 미세유체 채널의 단면적은 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3 또는 2 제곱 밀리미터($㎟$)보다 작을 수 있다.

[0018] 액체 채널(120)은 일반적으로 액체 채널(120) 주위의 폐쇄 루프인 채널 길이를 따라 임의의 형상의 단면을 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 액체 채널(120)은 원형 또는 타원형 단면과 같은 곡선 단면을 갖는다. 일부 실시예에서 액체 채널(120)은 다각형 단면을 갖는다. 일부 실시예에서, 액체 채널(120)은 불규칙한 단면을 갖는다. 도 2의 예에서, 액체 채널(120)은 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖는다. 본 명세서에서 사용되는 용어 "직사각형의"는 정사각형 형상을 포함한다. 액체 채널(120)은 도 2에서 볼 수 있는 높이(h)와 도 1 및 도 2 모두에서 볼 수 있는 폭(w)을 갖는다. 곡선 및/또는 불규칙한 모양의 단면을 갖는 액체 채널의 경우, 폭과 높이는 일반적으로 단면을 가로지르는 최대 폭 및 최대 높이이다.

[0019] 미세유체 채널은 유압 직경으로도 설명할 수 있다. 채널(120)은 또한 유압 직경(D_H)을 갖는다. 다음 방정식은 미세유체 채널의 유압 직경을 계산하는 데 사용된다:

$$D_H = \frac{4 \times cross\text{-}sectional\ area}{cross\text{-}sectional\ perimeter}$$

[0020]

[0021] 여기서 " 단면 둘레"는 단면적 주위의 둘레 길이이다. 다음 방정식은 특히 직사각형 단면을 갖는 미세유체 채널의 유압 직경을 계산하는 데 사용된다:

$$D_H = \frac{2 \times height \times width}{height + width}$$

[0022]

[0023] 일부 실시예에서, 미세유체 채널의 유압 직경은 5, 4, 3, 2 또는 1 ㎜ 보다 작을 수 있다. 적어도 하나의 실시예에서, 미세유체 채널의 미세유체 채널의 유압 직경은 1 ㎜ 미만일 수 있다.

[0024] 액체 채널(120)은 예를 들어 성형 작업, 레이저 커팅, 미세 가공, 포토리소그래피 및 3D 프린팅을 통해 기판(110)에 형성될 수 있다. 일부 실시예에서, 액체 채널(120)은 플라스틱의 사출 성형 또는 엠보싱을 통해 기판(110)에 형성된다. 다른 접근법을 사용하여 액체 채널(120)을 형성할 수도 있다. 다양한 실시예에서, 유체역학적 분리기(100)는 병렬로 작동하도록 구성된 복수의 동일한 액체 채널(120)을 정의한다. 다양한 실시예에서, 유체역학적 분리기(100)는 적어도 10개의 액체 채널을 포함한다. 다양한 실시예에서, 유체역학적 분리기(100)는 적어도 50개의 액체 채널 또는 적어도 100개의 액체 채널을 포함한다.

[0025] 유체역학적 분리기(100)이 복수의 동일한 액체 채널을 갖는 일부 실시예에서, 하나의 액체 채널(120)은 단일 기판 층 내에서 정의될 수 있다. 일부 다른 실시예에서, 단일 기판 층은 복수의 액체 채널(120)을 정의할 수 있다. 기판 층 내의 액체 채널은 병렬로 작동하도록 구성될 수 있다. 다양한 실시예에서, 다수의 기판 층은 적층 구성으로 쌓여, 각 기판 층에 의해 정의된 액체 채널(들)(120)도 적층 구성을 갖도록 할 수 있다. 기판과 액체 채널(120)의 적층 층은 유체역학적 분리기(100)를 형성한다. 유체역학적 분리기(100)는 미세유체 채널 입구(예: 입구(122))의 상류에 있고 각 미세유체 채널 입구와 직접 유체를 전달하는 입구 유동 채널(40)을 정의할 수 있다. 입구 유동 채널(40)은 일반적으로 각 액체 채널(120)의 유압 직경보다 큰 유압 직경을 가질 것이다. 유체역학적 분리기(100)는 출구(124)의 하류에 위치하고 직접 유체 전달하는 제1 출구 분기(50) 및 제2 출구 분기(52)을 정의할 수 있다. 제1 출구 분기(50) 및 제2 출구 분기(52)의 각각은 일반적으로 각 액체 채널의 유압 직경보다 큰 유압 직경을 가질 것이다. 이러한 구성은 채널을 통한 흐름을 균일하게 하는데 유리할 수 있다.

[0026] 액체 채널(120)은 액체 채널 내에서 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)를 갖는 액체를 수용하도록 구성된다. 곡선 채널 내의 유체 흐름은 두 개의 비차원 수, 즉 레이놀즈 수와 딘 수로 설명된다. 레이놀즈 수는 관성력과 점성력의 비율을 설명하며, 다음과 같이 정의된다:

$$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu}$$

[0027]

[0028] 여기서 ρ은 유체 밀도, U는 평균 유체 속도, μ은 유체의 동적 점도이다. 유체역학적 분리기에서 레이놀즈 수는 일반적으로 작으며(<1000), 이는 흐름 프로파일이 층류(laminar)임을 의미한다. 다양한 실시예에서, 시스템은 5와 25 사이의 딘 수(De)를 갖도록 구성된다. 다양한 실시예에서, 시스템은 5와 20 사이의 딘 수를 갖도록 구성된다. 딘 수는 곡선 파이프에서 유체 거동을 설명하며 유체에 작용하는 관성력, 구심력 및 점성력을 설명한다. 딘 수는 다음과 같이 정의된다:

$$De = Re\sqrt{\frac{D_H}{2R_c}}$$

[0029]

[0030] 유체역학적 시스템(10)은 일반적으로 액체 채널(120)에서 입자를 집속(focus)시키도록 구성된다. 본 명세서에서 "입자"라는 용어는 유체에 분산된 이산량(discrete amount)의 물질을 의미한다. 입자로 형성될 수 있는 물질의 비제한적인 예로는 먼지, 금속, 세포, 기포, 지방, 물방울 등이 있다. 한 가지 특정 예에서, 물방울은 휘발유 또는 디젤 연료와 같은 탄화수소 유체에 분산되어 에멀젼(emulsion)을 형성할 수 있다. 또 다른 예에서, 기포는 유압 유체에 분산될 수 있다. 다른 예에서, 세포는 수성 유체에 분산될 수 있다. 그 밖의 다른 예에서, 입자는 오렌지 주스의 펄프(pulp), 우유의 지방, 맥주 또는 와인의 불순물일 수 있다.

[0031] 다양한 구현에서, 유체역학적 분리기(100)는 액체 채널(120)의 유압 직경의 8 % 보다 큰 직경을 갖는 입자를 집속하도록 구성된다. 직경이 채널 유압 직경의 8 % 보다 큰 입자는 일반적으로 딘 수가 5 내지 25 범위일 때 내벽을 향해 집속된다. 유체역학적 분리기는 일반적으로 채널 높이의 50% 이하인 직경을 갖는 입자를 집속하도록 구성된다. 다양한 실시예에서, 본 명세서에 제공된 계산의 목적을 위해, 입자는 0.5보다 큰 구형도(sphericity)를 갖는다. 비구형(non-spherical) 입자의 경우, 여기에 제공된 계산의 목적상, 입자 직경은 부피 등가 구형 직경으로 간주된다. 다양한 실시예에서, 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 유체역학적 분리기는 액체 채널(120)에 있는 액체보다 최대 3배 밀도를 갖는 입자를 집속시키도록 구성된다.

[0032] 입자 집속은 두 가지 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 부유된 입자가 액체 채널(120)을 가로질러 액체 채널(120)의 상단 및 하단 가장자리로 이동하는 입자 이동 단계이다. 입자 이동 단계는 일반적으로 액체 채널 입구(122)에서 시작하여 액체 채널(120)의 입자 이동 길이(L_o)를 연장하여 액체 채널(120)의 입자 이동 영역(126)을 정의한다. 이 영역에서는 액체 채널(120)의 내벽(121)에 대한 추가 집속이 관찰되지 않는다. 두 번째 영역은 내벽(121)에 대한 집속의 양이 채널 길이를 따라 선형적으로 증가하는 선형 집속 영역(128)이다. 최대 입자 집속(focusing)에 도달할 때까지 집속이 계속된다. 최대 입자 집속에 도달한 후에는 추가 집속이 관찰되지 않는다. 선형 집속 영역(128)은 최대 입자 집속을 달성하는 데 필요한 길이인 선형 집속 길이(L_f)를 갖는다. 선형 집속 영역(128)은 일반적으로 입자 이동 영역(126)에서 채널 출구(12)를 향해 연장된다.

[0033] 선형 집속 영역(128) 이후의 액체 채널(120)의 길이를 완전 집속 영역(130)이라고 한다. 완전 집속 영역(130)은 선형 집속 영역(128)에서 출구(124)까지 연장되는 길이(L_{ff})를 갖는다. 다양한 구현에서 최대 입자 집속을 달성하면서 액체 채널(120)에 걸친 압력 강하를 낮추어 시스템의 에너지 요구 사항을 줄이기 위해 완전 집속 영역(130)을 제한하거나 제거하는 것이 바람직 할 수 있다.

[0034] 도 3은 곡선형 액체 채널의 길이를 따라 입자 집속의 세 가지 단계를 나타내는 대표적인 집속 거동을 보여주는 그래프이다. 입자 이동 영역(126)은 채널 길이의 대략 처음 16 mm를 차지하며, 선형 집속 영역(128)이 이어진다. 이 예에서 선형 집속 영역(128)은 액체 채널의 길이를 따라 약 114 mm 지점에서 최대 입자 집속을 달성한다. 입자 집속의 최대 값에 도달하면 입자 집속은 거의 일정하게 유지될 수 있다. 장치의 이 영역은 위에서 언급된 완전 집속 영역(130)으로 간주된다. 이 예에서 완전 집속 영역에서 최대 집속율(focusing percentage)은 약 90 % 이다 (즉, 입자의 90 %가 집속된 것이다).

[0035] 수학적으로 곡선 채널(도 1에 나타난 것과 같은)에서 최대 입자 집속을 달성하는 데 필요한 선형 집속 영역의 길이는 채널을 통한 입자 속도의 반경 방향 구성 요소를 기반으로 한 선형 함수이다(예: Di Carlo, D., Irimia, D., Tompkins, R. G., Toner, M.; Continuous Inertial Focusing, Ordering, and Separation of Particles in Microchannels. 미국 국립 과학원 회보, 2007년 11월, 제104권, 제4, 18892-7호), Dean Flow 프로파일의 반경 방향 구성 요소 또는 선형 집속 속도 U_D의 크기는 다음과 같다:

[0036] $$U_D \sim \frac{De^2 \mu}{\rho D_H}.$$

[0037] 이 관계는 텍사스주 플라노에 본사를 둔 Siemens PLM Software의 STAR-CCM+ 소프트웨어에서 전산 유체 역학을 사용하여 직사각형 채널에서 테스트되었다. 반경 방향 흐름 구성 요소를 측정하기 위해 가상 유체 영역의 중앙에 함수 탐침을 삽입했고, 채널의 깊이(Z 방향)에 맞추어 주요(primary) 유체 흐름 방향을 따라 불연속적인 반경 위치에 배치하였다. 전형적인 반경 방향 흐름 프로파일의 예시 시리즈가 도 4에 나와 있으며, 여기서 반경 속도(radial velocity)는 채널의 중심을 통과하는 깊이의 함수이다. 표시된 흐름 프로파일은 단일 장치 기하학적 구조와 유체 조합으로 구성되어 있고 다양한 딘 수에 걸치지만 채널 높이 h (150 μm), 폭 w (500 μm) 및 내부 반경 R_C (20 mm)는 일정하다. 이 좌표계에서 양의 흐름 속도는 유체가 장치의 외벽을 향해 이동하고 있음을 나타내며, 음의 흐름 속도는 유체가 장치의 내벽을 향해 이동하고 있음을 나타낸다. 채널 깊이의 중심에서 최대 반경 방향 흐름 구성 요소가 관찰된다. 이는 유체 관성에 의해 외벽을 향한 최대 속도에 해당한다. 채널 깊이의 중심 위아래로 대칭적으로 관찰되는 두 개의 최소 반경 방향 흐름 구성요소가 있다. 이러한 흐름 구성 요소는 내벽을 향한 재순환 흐름이며, 이는 궁극적으로 입자를 최종 집속 위치로 수동적으로 이동시키는 역할을 한다.

[0038] 네 가지 서로 다른 딘 수(De = 5, 10, 15, 20)에서 서로 다른 액체 채널 폭에 대한 최소 반경 방향 유동 속도는 Dean Flow 프로파일의 반경 방향 구성 요소 크기를 나타내는 문헌 방정식과 비교하여 도 5에 표시되었다. 보이

는 바와 같이, 이 방정식은 서로 다른 액체 채널 폭에 걸쳐 선형 관계를 정의하지 않으므로 반경 속도의 정확한 예측 변수가 아니다. 추가 테스트 및 분석 과정에서 선형 집속 속도(U_D)에 대해 다음과 같은 관계가 발견되었다:

[0039] $$U_D \sim \frac{De^2\mu}{\rho w}.$$

[0040] 이 방정식은 최소 반경 속도에 대해 그래프로 표시되었고 그 결과는 도 6에 반영된다. 보이는 바와 같이, 서로 다른 액체 채널 폭을 갖는 장치에서 나온 데이터는 단일 선형 곡선으로 합쳐진다. 이 관계는 유체역학적 분리기와 관련된 딘 수 범위(5 < De < 25)에서 장치의 기하학적 구조(폭, 높이, R_C) 및 유체 특성(점도 및 밀도)을 변경할 때에도 적용된다. 구체적으로, 최소 반경 속도는 다음과 같은 것으로 나타났다:

[0041] $$U_D = -0.02597 * \frac{De^2\mu}{\rho w} - 1.107 * 10^{-4}$$

[0042] 여기서 μ은 cP 단위, w는 마이크론(micron) 단위, ρ는 g/cm^3 단위, U_D는 m/s 단위이다.

[0043] 최소 반경 속도를 기반으로, 최대 입자 집속을 얻기 위해 선형 집속 영역의 길이를 결정하는 방정식을 도출할 수 있다. 액체 채널의 폭을 가로지르는 속도는 거의 일정하므로, 입자가 액체 채널의 폭을 가로질러 내벽으로 이동하는 데 걸리는 시간은 다음과 같다:

[0044] $$t \propto \frac{w}{U_D} = \frac{w^2\rho}{De^2\mu}.$$

[0045] 따라서, 선형 집속 영역의 길이는 다음과 같다:

[0046] $$L_f \propto tU = \frac{w^2\rho}{De^2\mu}\mathrm{U}$$

[0047] 여기서 U는 유체의 평균 속도이다.

[0048] $$U = \frac{Re\mu}{\rho D_H}$$

[0049] 를 대입하면 다음과 같이 된다:

[0050] $$L_f \propto \frac{Re}{De^2}\frac{w^2}{D_H} = \frac{2R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2$$

[0051] 그리고, 더 구체적으로,

[0052] $$L_f = 156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2 + 24.3.$$

[0053] 선형 집속 영역은 일반적으로 높은 딘 수에서 짧아지며, 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 유체역학적 분리기의 작동 범위는 5 내지 25 사이의 범위의 딘 수이기 때문에 선형 집속 길이(L_f)는 일반적으로 최소값이

[0054] $$L_f = \frac{Rew^2}{8D_H} + 24.3.$$

[0055] 가 된다.

[0056] 입자 집속 속도(즉, 선형 집속 영역의 기울기)를 사용하여 추가로 80 %의 입자를 집속하는데 필요한 길이를 계산했다. 추가로 80%의 입자를 집속시키면 집속 효율이 90 % 이상으로 증가할 것이다. 이는 장치 입구에서 이미 10 % ~ 20 %의 입자가 집속 위치에 있기 때문이다. 실험 결과와 관련된 관찰된 집속 길이는 위의 집속 길이(L_f)

방정식에 대해 그래프로 나타내었으며, 이는 도 7에 반영되어 있다. 오차 막대는 선형 집속 영역의 기울기의 불확실성을 기반으로 한 표준 오차에 해당한다. 이 적합도는 장치 폭과 곡률 반경의 변화에 의해 지배되는 명확한 추세를 보여준다. 데이터를 자세히 살펴보면 집속 길이(L_f)는 입자 크기에 따라 달라진다. 특히 작은 입자는 큰 입자보다 더 빨리 집속된다. 실제로 크기가 다른 입자는 서로 다른 양력을 경험하므로 다른 높이에서 장치의 폭을 통과시킨다. 선형 집속 길이(L_f)에 입자 구속력(a/D_h)을 곱하면 결과가 나온다는 것이 발견된다.

[0057] $$L_f \propto \frac{2R_c a w^2}{ReD_H^3}$$

[0058] 그리고 더 구체적으로

[0059] $$L_f = 1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3} + 6.4$$

[0060] 이는 도 8에 반영된 것처럼 관찰된 실험적 집속 길이와 비교하여 도식화되었다. 데이터는 선형 적합으로 합쳐졌으며, 0.95보다 큰 R_2 값을 나타낸다.

[0061] 선형 집속 영역의 길이(L_f)로 설명되는 대신, 선형 집속 영역은 중심 축(x)을 기준으로 한 선형 집속 영역(128)의 호 측정(도)을 나타내는 집속 각도(α)로도 설명될 수 있다:

[0062] $$\alpha \propto \frac{aw^2}{\pi ReD_H{}^3}$$

[0063] 또는 더 구체적으로

[0064] $$\alpha = 265{,}682\frac{aw^2}{\pi ReD_H{}^3} + 45.1$$

[0065] 이는 도 9의 실험 데이터에 대해 도식화되어 있다. 설명된 바와 같이, 본 명세서에 개시된 기술에 부합하는 다양한 액체 채널은 360도보다 큰 집속 각도를 필요로 하며, 이는 "단순" 유체역학적 분리기로는 완전한 집속이 발생할 수 없음을 나타낸다. 여기서 "단순" 유체역학적 분리기는 액체 채널이 중심 축(x)에 대한 전체 회전보다 작은 것을 말한다.

[0066] 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 다양한 유체역학 시스템의 실제 입자 이동 길이(L_0)와 입자 집속 길이(L_f)를 측정하는 일련의 실험이 수행되었다. 표준 방법을 사용하여 PDMS와 유리 슬라이드로 다양한 장치 높이와 폭의 유체역학적 분리기를 생성했다. 형광 표지된 입자 용액을 5 ~ 25사이의 딘 수 내에 알려진 유속으로 유체역학적 분리기 채널에 도입했다. CMOS 카메라를 사용하여 유체역학적 분리기를 따라 다양한 위치에서 이미지를 촬영했다. 이미지 처리는 채널 위치와 길이의 함수로서 입자 농도를 식별하는 데 사용되었다. 입자 집속 길이(L_f)도 위에 제공된 방정식에 따라 계산되었다. 결과는 아래 표 1에 반영되어 있다.

표 1

No.	실험적 L_0 (mm)	실험적 L_f (mm)	실험적 (Lo/(Lo+Lf))	Lo/Lf	$L_f = 156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2 + 24.3$	$L_f = 1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3} + 6.4$
1	13	381	3.30%	3.4%	395	370
2	0	87	0%	0%	82	110
3	13.5	140	8.70%	9.6%	145	148
4	16.5	138	10.70%	12.0%	105	101
5	20.7	286	6.70%	7.2%	271	297
6	5.9	58	9.10%	10.2%	62	69
7	19.4	68	22.30%	28.5%	50	48
8	7	222	3.10%	3.2%	161	188
9	16.5	133	11.00%	12.4%	136	155
10	5.2	133	3.80%	3.9%	99	105
11	18.9	65	22.50%	29.1%	77	76
12	12.6	61	17.20%	20.7%	64	59
13	16.9	62	21.50%	27.3%	103	76
14	18.5	47	28.20%	39.4%	77	53
15	12.6	44	22.30%	28.6%	64	41
16	30.8	138	18.30%	22.3%	174	168

[0067]

[0068] 실험 결과 전반에 걸쳐, 입자 집속 길이(L_f)는 입자 이동 길이(L_0)보다 더 컸다. 입자 이동 길이(L_0)는 전체 액체 채널 길이(L_D)의 0 % 내지 28.2 % 범위에 해당했다. 또한, 입자 이동 길이(L_0)는 입자 이동 길이(L_f)의 0 % 내지 39.4 % 범위에 해당했다. 따라서, 일부 실시예에서, 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 액체 채널은 입자 이동 길이(L_f)와 거의 동일한 액체 채널 길이(L_D)를 가질 것이다. 다양한 실시예에서, 본 명세서에 개시된 기술과 일치하는 액체 채널은 입자 이동 길이(L_f)보다 긴 액체 채널 길이(L_D)를 가질 것이다. 수집된 데이터를 바탕으로, 많은 실시예에서 액체 채널 길이(L_D)는 입자 이동 길이(L_f)보다 40 % 미만 더 긴 것으로 보인다. 액체 채널 길이(L_D)는 입자 이동 길이(L_f)보다 최대 30% 더 길거나 그 이하일 수 있다. 액체 채널 길이(L_D)는 입자 이동 길이(L_f)보다 최대 20 % 더 길거나 그 이하일 수 있다. 일부 실시예에서 액체 채널 길이(L_D)는 입자 이동 길이(L_f)보다 3 % 내지 20 % 더 길 수 있다.

[0069] 도 10 및 도 11은 일부 실시예와 일치하는 또 다른 예시적인 유체역학적 분리기(200)의 개략도를 보여준다. 도 10은 개략적인 사시도이고, 도 11은 유체역학적 분리기의 입구 측을 정면에서 본 개략도이며, 여기서 액체 채널(220)이 점선으로 표시되어 있다. 유체역학적 분리기(200)는 모순되는 경우를 제외하고는 상기 설명과 일반적으로 일치한다. 유체역학적 분리기(200)는 액체 스트림에 분산된 입자를 집속하도록 구성된다. 유체역학적 분리기(200)는 기판(210)으로 구성된다. 기판(210)은 입구(222)와 출구(224)를 갖는 액체 채널(220)을 정의한다. 액체는 입구(222)에서 출구(224)로 유체역학적 분리기(200)의 액체 채널(220)을 통해 흐르도록 구성된다. 현재 도시되어 있지는 않지만, 도 1을 참조하여 전술한 바와 유사하게 제1 출구 분기 및 제2 출구 분기가 출구(224)에서 바깥으로 연장될 수 있음을 주목할 필요가 있다.

[0070] 액체 채널(220)은 입구(222)에서 출구(224)까지의 채널 길이(L_D)를 정의한다. 액체 채널(220)은 일반적으로 중심 축(x)을 중심으로 내부 반경(R_C)을 정의하도록 곡선화된다. 따라서, 액체 채널(220)은 중심 축(x)를 중심으로 원주 방향으로 확장되어 채널 호 측정을 정의한다. 현재 예에서 액체 채널(220)은 중심 축(x)을 중심으로 약 810° 확장된다. 현재 예에서 내부 반경(R_C)은 채널의 길이 전체에 걸쳐 실질적으로 일정하다. 현재 예에서 액체 채널(220)은 중심 축(x)을 기준으로 나선을 형성한다. 액체 채널(220)의 나선형 배열은 일정한 내부 반경(R_C)과 중심 축(x)을 중심으로 한 여러 회전을 모두 가능하게 한다. 그러나 일부 실시예에서 내부 반경이 일정하지 않다.

[0071] 액체 채널(220)은 일부 실시예에서 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 가질 수 있으며, 이는 도 11에서 입구(222)에 도시되어 있다. 액체 채널(220)의 단면은 일반적으로 채널(220)을 통한 유체 흐름 방향에 수직이다. 채

널(220)은 도 2에 도시된 높이(h)와 도 11에 도시된 폭(w)을 갖는다. 채널(220)은 또한 개시된 바와 같은 유압 직경(D_H)을 갖는다.

[0072] 위에서 논의된 예와 유사하게, 입자 집속은 두 개의 구별된 단계에서 발생할 수 있다. 액체 채널 길이(L_D)를 최적화하기 위해 완전히 집속된 영역은 피하며, 액체 채널의 전체 길이가 입자 이동 길이(L_0)와 입자 집속 길이(L_f)가 된다. 액체 채널 길이(L_D) 및/또는 호 측정의 최적화는 일반적으로 상기 논의와 일치한다.

[0073] 도 1 내지 도 2 및 도 10 내지 도 11의 예와 일치하는 다양한 실시예에서, 높이 h, 너비 w, 내부 반경 R_C와 같은 액체 채널 치수는 액체 채널의 길이에 걸쳐 실질적으로 일정하며, 이는 이러한 치수가 액체 채널 길이 전체에서 가중 평균값의 5%를 넘지 않게 변하는 것을 의미한다. 본 명세서에 제공된 방정식은 일반적으로 액체 채널이 실질적으로 내부 반경 R_C이 거의 일정한 액체 채널 길이의 최적화를 위한 것이다. 일부 실시예에서, 채널 폭 w는 채널의 길이 전체에서 실질적으로 일정하지 않다. 이러한 실시예에서, 액체 채널 길이의 최적화를 위해 본 명세서에 제공된 방정식에 채널 길이에 따른 채널 폭 w의 가중 평균값을 사용될 수 있다. 다양한 예에서, 최적화된 채널 길이는 집속 영역 내의 채널 치수의 가중 평균값을 기준으로 할 수 있다.

[0074] 본 명세서에 개시된 기술의 일부 실시예에서, 유체역학적 분리기 시스템은 액체 채널 길이의 적어도 일부에 대해 테이터 형태의(tapered) 액체 채널 폭을 갖는다. 여기서 "테이퍼(taper)"라는 단어는 제1폭 w_1과 제2폭 w_2 사이의 계단식 전환과 같은 급격한 변화를 제외하고 비교적 점진적인 확장 또는 수축을 의미하는 데 사용된다. 테이퍼는 예를 들어 선형, 포물선형, 또는 지수 함수형(exponential)일 수 있고, 그 외에도 다양한 테이퍼 형상이 가능하며, 테이퍼 영역을 따라 여러 테이퍼 형상을 조합할 수도 있다. 테이퍼가 적용된 액체 채널은 채널의 집중 길이를 유리하게 줄일 수 있으며, 이를 통해 원하는 분리 효율을 달성하기 위해 필요한 채널 길이를 줄일 수 있음이 밝혀졌다. 실용적인 관점에서 볼 때, 액체 채널의 폭이 좁을수록 입자가 내벽 쪽으로 집속할 수 있는 경로가 짧아지고, 이를 통해 시스템은 더 작은 크기를 가질 수 있다. 반면에, 액체 채널의 폭이 클수록 채널을 따라 발생하는 압력 강하가 낮아져 액체를 채널을 통해 펌핑하는 데 필요한 에너지가 줄어든다. 또한, 출구에서 액체 채널의 폭이 상대적으로 넓으면, 집속된 입자를 포함하는 유체 스트림의 부분을 나머지 유체 스트림으로부터 효과적으로 분리할 수 있다. 액체 채널의 테이퍼링은 이러한 요소들과 기타 요인을 균형 있게 조절하면서 원하는 분리 효율을 달성하는 데 유리할 수 있다.

[0075] 도 12는 일부 실시예와 일치하는 또 다른 예시적인 유체역학적 분리기 시스템의 개략도이다. 이 시스템은 도 1을 참조하여 위에서 논의된 바와 같이 유체 공급원(20), 펌프(30), 입구 유동 채널(40) 및 출구 유동 분기(50, 52)를 포함한다. 이 시스템은 모순되는 경우를 제외하고는 일반적으로 위의 설명과 일치하는 유체역학적 분리기(300)를 포함한다. 유체역학적 분리기(300)는 액체 스트림에 분산된 입자를 집속하도록 구성된다. 유체역학적 분리기(300)는 기판(310)으로 구성된다. 기판(310)은 입구(322) 및 출구(324)를 갖는 액체 채널(320)을 정의한다. 액체는 유체역학적 분리기(300)의 액체 채널(320)을 통해 입구(322)에서 출구(324)로 흐르도록 구성된다.

[0076] 액체 채널(320)은 입구(322)에서 출구(324)까지의 채널 길이(L_D)를 정의한다. 액체 채널(320)은 일반적으로 중심 축(x)을 중심으로 내부 반경(R_C)을 정의하도록 곡선화된다. 따라서 액체 채널(320)은 중심 축(x)을 중심으로 원주 방향으로 연장되어 채널 호 측정을 정의한다. 현재 예에서 액체 채널(320)은 중심 축(x)을 중심으로 약 180° 연장된다. 현재 예에서 내부 반경(R_C)은 채널의 길이를 따라 실질적으로 일정하지만 일부 다른 실시예에서는 내부 반경이 일정하지 않다.

[0077] 액체 채널(320)은 현재는 보이지 않지만 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 가질 수 있으며, 액체 채널(320)은 위에서 설명한 다른 형태의 단면을 가질 수 있다. 액체 채널(320)은 현재 보이지 않는 높이(h)를 가지며, 도 12에서 볼 수 있는 제1 채널 폭(w_1) 및 제2 채널 폭(w_2)을 갖는다. 이 특정 예에서, 액체 채널(320)은 일정한 폭을 가지지 않는다. 채널 폭은 입구와 출구 사이에서 테이퍼된다. 구체적으로, 액체 채널(320)의 제1 영역(326)은 제1 폭(w_1)을 정의하고, 액체 채널(320)의 제2 영역(328)은 제2 폭(w_2)을 정의하며, 테이퍼 영역(327)은 제1 폭(w_1)과 제2 폭(w_2) 사이로 연장되어 제1 폭(w_1)에서 제2 폭(w_2)으로의 원활한 전환을 제공한다. 현재 예에서, 액체 채널의 폭은 더 작은 폭에서 더 큰 폭으로 테이퍼된다. 더 구체적으로, 액체 채널의 폭은 액체 채널(320)의 길이의 적어도 일부를 따라 증가한다.

[0078] 출구(324)에서 상대적으로 더 큰 채널 폭은 집속된 입자를 나머지 유체 스트림에서 분리하는 데 유리하게 작용

할 수 있으며, 이는 집속된 입자 (일반적으로 내벽(321) 쪽에 위치)와 집속된 입자가 없는 유체(외벽(323) 쪽에 위치) 사이의 상대적 거리와 관련된 물리적 제한에 기초한다. 채널 폭이 작을수록, 집속된 입자의 일부가 제1 출구 유동 분기(50) 대신 제2 출구 유동 분기(52)로 빠져나올 확률이 더 높고, 이는 단순히 제1 출구 유동 분기(50)와 제2 출구 유동 분기(52)가 서로 가깝기 때문이다. 또한, 상대적으로 더 넓은 채널 폭을 갖는 경우, 집속된 입자가 총 채널 폭의 상대적으로 작은 비율로 집속될 수 있으며, 이는 입자가 실수로 제2 출구 분기(52)로 빠져나갈 기회를 더욱 줄인다.

[0079] 일부 실시예에서 제1 영역(326) 및 제2 영역(328)은 거의 같은 길이를 가질 수 있지만, 현재 실시예에서 제1 영역(326)은 제2 영역(328)보다 짧다. 일부 실시예에서 제1 영역(326)은 제2 영역(328)보다 더 긴 길이를 갖는다. 일부 실시예에서 테이퍼 영역(327)은 제1 영역(326) 또는 제2 영역(328) 중 하나 또는 둘 다 보다 길다. 현재 예에서 액체 채널(320)의 외벽(323)의 반경만이 제1 영역(326)과 제2 영역(328) 사이에서 테이퍼된다. 일부 다른 실시예에서 외벽(323)의 반경과 내벽(321)의 반경이 제1 영역(326)과 제2 영역(328) 사이에서 테이퍼된다. 또 다른 실시예에서는 내벽(321)의 반경만이 제1 영역(326)과 제2 영역(328) 사이에서 테이퍼된다.

[0080] 현재의 실시예에서는 액체 채널(320)의 길이 전체에서 하나의 테이퍼 영역이 있지만, 액체 채널(320)에 채널 길이 전체에서 복수의 테이퍼 영역(327)이 있을 수 있다는 점이 이해될 것이다.

[0081] 일부 구현예에서, 최적의 채널 길이를 이러한 계산에서 액체 채널(320)의 길이를 따른 폭의 가중 평균을 사용하여 근사할 수 있다. 도 12와 일치하는 일부 구현예에서, 최대 집속을 달성하기 위해 다음이 참이다:

[0082] $$1 \leq \frac{L_{w1}}{L_{f(w1)}} + \frac{L_{w2}}{L_{f(w2)}}$$

[0083] 여기서, L_{w1} 및 L_{w2}는 각각 채널의 제 1 영역(326)(제 1 폭 w_1을 갖는) 및 제 2 영역(328)(제 2 폭 w_2를 갖는)의 실제 길이이다. $L_{f(w1)}$ 및 $L_{f(w2)}$는 각각 제1 영역(326)과 일치하는 채널 및 제2 영역(328)과 일치하는 채널의 이론적 선형 집속 길이이다. 테이퍼링 영역(327)의 길이가 L_{w1} 및 L_{w2}에 비해 상대적으로 작을 경우, 선형 집속 길이(L_f)는 다음과 같다:

[0084] $$L_f = \alpha L_{f(w1)} + (1-\alpha) L_{f(w2)}$$

[0085] 여기서 $\alpha = \frac{L_{w1}}{L_{f(w1)}}$ 는 제1 영역(326) 내에서 발생하는 집속 비율에 해당하고, $(1-\alpha) = \frac{L_{w2}}{L_{f(w2)}}$ 는 제2 영역(328) 내에서 발생하는 추가 집속 비율에 해당한다. "상대적으로 작은" 것은 테이퍼링 영역(327)이 제1 영역(326)과 제2 영역(328)의 결합 길이의 30 %, 20 % 또는 심지어 10 %보다 작다는 것을 의미한다.

[0086] 일부 다른 구현예에서, 집속 영역의 전체 길이를 계산하기 위한 목적으로, 테이퍼 영역의 첫 번째 부분은 제1 영역(326)의 길이의 일부로 간주될 수 있고, 테이퍼 영역의 두 번째 부분은 제2 영역(328)의 길이의 일부로 간주될 수 있다. 예를 들어, 테이퍼 영역(327)의 길이의 절반은 제1 영역(326)의 길이의 일부로 간주될 수 있고, 나머지 절반은 제2 영역(328)의 길이의 일부로 간주될 수 있다. 다른 접근 방식도 사용될 수 있다.

[0087] 도 13은 일부 실시예와 일치하는 또 다른 예시적인 유체역학적 분리기 시스템의 개략도이다. 시스템은 도 1을 참조하여 위에서 논의된 바와 같이 유체 공급원(20), 펌프(30), 입구 유동 채널(40) 및 출구 유동 분기(50, 52)를 갖는다. 시스템은 현재 논의와 모순되는 경우를 제외하고는 일반적으로 상기 설명과 일치하는 유체역학적 분리기(400)를 갖는다. 유체역학적 분리기(400)는 액체 스트림에 분산된 입자를 집중시키도록 구성된다. 유체역학적 분리기(400)는 기판(410)으로 구성된다. 기판(410)은 입구(422) 및 출구(424)를 갖는 액체 채널(420)을 정의한다. 액체는 유체역학적 분리기(400)의 액체 채널(420)을 통해 입구(422)에서 출구(424)로 흐르도록 구성된다.

[0088] 액체 채널(420)은 입구(422)에서 출구(424)까지의 채널 길이(L_D)를 정의한다. 액체 채널(420)은 일반적으로 중심 축(x)을 중심으로 내부 반경(R_C)을 정의하도록 곡선화된다. 액체 채널(420)은 채널 호 측정을 정의하기 위해 중심 축(x)을 중심으로 원주 방향으로 확장된다. 현재 예에서, 액체 채널(420)은 중심 축(x)을 중심으로 약 180° 확장한다. 현재 예에서, 내부 반경(R_C)은 채널의 길이를 따라 실질적으로 일정하지만 일부 다른 실시예에서는

내부 반경이 일정하지 않다.

[0089] 액체 채널(420)은 채널 길이를 따라 직사각형 또는 다른 형태의 단면을 가질 수 있으며, 이는 현재 보이지 않지만 도 2에 도시된 것 또는 여기 다른 곳에 설명된 다른 형태와 유사할 수 있다. 액체 채널(420)은 높이(h)(도 2 참조), 제1 채널 폭(w_1) 및 제2 채널 폭(w_2)을 갖는다. 이 특정 예에서 액체 채널(420)은 일정한 폭을 갖지 않는다. 채널 폭은 입구(422)와 출구(424) 사이에서 테이퍼된다. 위에서 설명한 예와 달리, 현재 예에서는 채널 폭이 입구(422)에서 출구(424)로 테이퍼된다. 그러나 일부 다른 예에서는 채널(420)의 길이의 일부는 일정한 폭을 가질 수 있고, 채널(420)의 길이의 다른 일부는 테이퍼 형태의 폭을 가질 수 있다.

[0090] 현재 예에서, 액체 채널(420)의 외벽(423)의 반경만이 입구(422)와 출구(424) 사이에서 테이퍼된다. 일부 다른 실시예에서, 외벽(423)의 반경과 내벽(421)의 반경은 각각 입구(422)와 출구(424) 사이에서 테이퍼된다. 또 다른 실시예에서, 내벽(421)의 반경만이 입구(422)와 출구(424) 사이에서 테이퍼된다.

[0091] 현재 예에서, 액체 채널의 폭은 더 작은 폭에서 더 큰 폭으로 테이퍼된다. 더 구체적으로, 액체 채널 폭은 액체 채널(420)의 길이의 적어도 일부를 따라 증가한다.

[0092] 액체 채널이 입구에서 출구로 갈수록 더 큰 폭에서 더 작은 폭으로 테이퍼되는 경우, 일부 구현에서 바람직하지 않을 수 있다는 점에 유의한다. 예를 들어, 상대적으로 작은 채널 출구(424)는 집속된 입자를 갖는 유체의 부분을 유체의 나머지 부분으로부터 분리하는 데 있어 제1 출구 분기(50) 및 제2 출구 분기(52)를 통해 실질적인 어려움을 초래할 수 있다.

[0093] **예시**

[0094] **예시 A (물 속 25 μm 입자)**

[0095] 유체역학적 분리기는 물 속에서 25 μm 입자를 집속시키도록 설계된다. 주요 매개변수는 표 2에 나와 있다. 입자가 집속되는 유량 범위는 약 1.3 mL/min ~ 6.5 mL/min (Dean 수 = 5.1 ~ 25.3)이다. 이 유량에 대한 선형 집속 영역 길이는 표 3에 표시된 대로 계산된다. 시스템 압력 강하는 직선 채널 계산을 기반으로 한 예상 압력 강하이며, 사소한 손실이나 2차 흐름의 영향은 포함되지 않는다.

표 2

[0096]

유체 밀도 (g/mL)	0.998
채널 높이 (μm)	150
채널 폭 (μm)	500
유압 치수 (μm)	231
점도 (cP)	1
곡률 반경 (mm)	20
입자 구속	0.11

표 3

[0097]

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$	
유량 (mL/min)	딘 수 (De)	L_t(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)	L_t(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)
1.31	5.1	245	415	250	423
2.60	10.1	135	456	128	434
3.91	15.2	98	498	87	442
5.20	20.2	79	535	67	448
6.51	25.3	68	575	55	465

[0098] **예시 B (연료 내 10 μm 입자, 다양한 곡률 반경)**

[0099] 유체역학적 분리기는 유체 내 10 μm 입자를 집중시키도록 설계된다. 주요 매개변수는 표 4에 나와 있다. 선형 집속 영역 길이와 예상 압력 강하는 일정한 딘 수(De = 10)에서 다양한 유체역학적 분리기 곡률 반경에 대해 계산할 수 있다. 이 데이터는 표 5에 나와 있다. 시스템 압력 강하는 직선 채널 계산을 기반으로 한 예상 압력 강하이며 사소한 손실이나 2차 흐름의 영향은 포함되지 않는다. 곡률 반경이 클수록 채널을 통한 유량은 증가하지만, 압력 강하도 증가한다는 단점이 있다.

표 4

[0100]

유체 밀도 (g/mL)	0.85
채널 높이 (μm)	100
채널 폭 (μm)	150
유압 치수 (μm)	120
점도 (cP)	3
입자 구속	0.08

표 5

[0101]

			$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$	
곡률 반경 (mm)	유량 (mL/min)	딘 수 (De)	L_t(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)	L_t(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)
10	3.4	10	43.3	10633	21.6	5304
20	4.8	10	51.2	17749	28.4	9828
30	5.9	10	57.1	24331	33.4	14228
40	6.8	10	62.3	30596	37.8	18570

[0102] **예시 C (와인 속 8 ~ 12 μm 입자)**

[0103] 유체역학적 분리기는 와인에 있는 8 μm ~ 12 μm 입자를 집속시키도록 설계된다. 이는 맥주나 와인을 정화하는 과정에서 효모를 제거하는 것을 나타낸다. 주요 매개변수는 표 6에 나와 있다. 선형 집속 영역 길이는 표 7과 같이 다양한 유량에 대해 계산된다. 이 계산에는 가장 큰 입자 크기(12 μm)가 사용된다. 시스템 압력 강하는 직선 채널 계산을 기반으로 한 예상 압력 강하이며, 사소한 손실이나 2차 흐름의 영향은 포함되지 않는다.

표 6

[0104]

유체 밀도 (g/mL)	1.05
채널 높이 (μm)	75
채널 폭 (μm)	150
유압 치수 (μm)	100
유체 점도 (cP)	1.8
곡률 반경 (mm)	20
입자 구속 (8μm)	0.08
입자 구속 (12μm)	0.12

표 7

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c aw^2}{ReD_H^3}+6.4$	
유량 (mL/min)	딘 수 (De)	L_f(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)	L_f(mm)	시스템 압력 강하 (mbar)
1.16	5	94	9070	63	6040
2.32	10	59	11390	49	9300
3.48	15	48	13900	34	9940
4.64	20	42	16210	27	10440

[0105]

[0106] **예시 D (폭이 두 개인 장치)**

[0107] 유체역학적 분리기는 와인에서 8 μm ~ 12 μm 입자를 집속시키도록 구성된다. 일부 구현에서, 이러한 분리기를 맥주나 와인을 정화하는 과정에서 효모를 제거하는 데 사용할 수 있다. 유체역학적 분리기는 폭이 다른 두 개의 영역, 즉 W_1과 W_2, 그리고 길이가 1 mm 이하인 비교적 작은 전이 영역을 가지고 있다. 유량은 3.48 mL/min이다. 주요 매개변수는 표 8에 나와 있다. 분리기는 제1 영역에서 α %의 집속을 달성하고 제2 영역에서 (1 - α) %의 집속을 달성하도록 구성되어 입자가 제2 영역의 끝에서 완전히 집속되도록 한다. 각 영역의 길이, L_{w1} 및 L_{w2}, 그리고 전체 집속 길이 L_f는 표 9에서 계산되어 있다.

표 8

유체 밀도 (g/mL)	1.05
유체 유량 (mL/min)	3.48
채널 높이 (μm)	75
영역 1 채널 폭 (μm)	100
영역 2 채널 폭 (μm)	150
영역 1 유압 치수 (μm)	86
영역 2 유압 치수 (μm)	100
유체 점도 (cP)	1.8
곡률 반경 (mm)	20
영역 1 입자 구속 (8μm)	0.09
영역 1 입자 구속 (12μm)	0.14
영역 2 입자 구속 (8μm)	0.08
영역 2 입자 구속 (12μm)	0.12

[0108]

표 9

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$			$1598.8\frac{R_c aw^2}{ReD_H^3}+6.4$		
영역 1 집속 (α)	영역 2 집속 (1-α)	L_{w1} (mm)	L_{w2} (mm)	L_f (mm)	L_{w1} (mm)	L_{w2} (mm)	L_f (mm)
0%	100%	0	48	48	0	34	34
25%	75%	9	36	45	5	26	31
50%	50%	18	24	42	11	17	28
75%	25%	26	12	38	16	9	25
100%	0%	35	0	35	21	0	21

[0109]

[0110] 일반적으로 더 좁은 채널(영역 1)에서의 집속 비율을 증가시키면 전체 집속 길이를 줄일 수 있지만, 이는 채널

치수가 작아짐에 따라 압력 강하가 증가하는 대가를 치르게 된다. 최적의 설계는 적용 요구 사항에 따라 달라질 것이다.

[0111] **예시 E (테이퍼 형태의 폭을 갖는 채널)**

[0112] 본 명세서에서 확인된 이론적 계산을 사용하여 미세유체 채널의 채널 폭을 테이퍼링 하는 것이 집속 길이에 미치는 영향을 확인하기 위해 두 개의 미세유체 채널을 비교한다. 기준 미세유체 채널은 채널 입구에서 채널 출구까지 628.4 μm의 일정한 폭을 유지하는 반면, 비교 미세유체 채널은 입구에서 500 μm의 채널 폭을, 출구에서 628.4 μm의 채널폭을 갖는다. 비교 미세유체 채널의 채널 폭은 채널 입구에서 채널 출구까지 채널 길이 1 mm당 채널 폭이 0.001 mm씩 일정한 비율 k 로 넓어지는 테이퍼를 갖는다. 테이퍼형 설계에서 내벽은 일정한 곡률 반경을 유지하는 반면, 외벽은 바깥쪽으로 테이퍼된다.

[0113] 기준 미세유체 채널 및 비교 미세유체 채널은 각각 150 μm의 일정한 채널 높이와 25 mm의 일정한 내부 곡률 반경을 갖는 내벽을 가졌다. 또한, 두 채널을 통과하는 액체의 유량은 동일하다.

[0114] 입자 집속으로 인한 입자의 측면 이동은 액체 채널 길이 x위치에서의 Dean Flow의 반경 방향 구성 요소에 비례하는 것으로 가정되었다:

[0115] $$U_D(x) = \frac{w(x)U(x)}{L_f(x)}$$

[0116] 여기서 w(x)는 액체 채널의 길이를 따라 x 위치에서의 채널 폭, U(x)는 x 위치에서 채널을 통과하는 유체의 평균 속도, L_f(x)는 채널 폭 w(x)가 일정하다고 가정할 때 x 위치에서 장치 및 유체 특성에 따른 선형 집속 영역에 필요한 길이이다. 직선 채널에서의 입자 이동 실험 결과 선형 집속 영역의 길이는 다음과 같다:

[0117] $$L_f(\mathrm{x}) = 156.2\frac{R_c}{Re(x)}\left(\frac{w(x)}{D_H(x)}\right)^2 + 24.3$$

[0118] 여기서 Re(x)는 x위치에서의 레이놀즈(Reynolds) 수이고, D_H(x)는 x 위치에서의 유압 직경으로, x 위치에서의 폭 w 가 일정하다고 가정한다.

[0119] 내벽의 반경이 일정하고 외벽이 바깥쪽으로 테이퍼되는 테이퍼형 채널에서는 채널을 통과하여 흐르는 유체가 바깥쪽으로 확장되어 채널을 채운다. 그 결과, 채널 내의 입자는 바깥쪽으로(즉, 내벽에서 멀어져 외벽으로) 이동하며, 이는 다음 방정식으로 근사할 수 있다:

[0120] $$U_M(x) = \frac{p(x)U(x)k}{\mathrm{w}(x)}$$

[0121] 여기서 U_M(x)은 입자의 바깥쪽 이동, p(x)는 입자에서 내부 채널 벽까지의 거리, U(x)는 유체의 평균 속도, k는 단위 길이당 외벽의 테이퍼링 비율, w(x)는 x위치에서의 채널 폭이다. 채널 확장으로 인한 입자의 바깥쪽 측면 이동은 입자 집속에 반대되는 효과를 나타낸다. 따라서 바깥쪽으로 테이퍼된 채널에서 입자의 측면 이동 U_{DM}(x)는 다음 방정식으로 근사된다:

[0122] $$U_{DM}(x) = U_D(x) - U_M(x)$$

[0123] 또는

[0124] $$U_{DM}(x) = \frac{w(x)U(x)}{L_f(x)} - \frac{p(x)U(x)k}{\mathrm{w}(x)}.$$

[0125] 입자가 채널의 외벽에서 내벽으로 측면 이동하는 데 필요한 시간을 근사할 수 있는 수치 적분이 개발되었다(집속 시간):

[0126] $$t_{f,tapered} = \int_0^{w_o} \frac{dw}{U_D(x)},$$

[0127] 여기서 w_0은 채널의 초기 폭이다. 입자가 채널의 외벽에서 내벽으로 측면 이동하는 데 필요한 채널 길이인 테이퍼형 채널의 집속 길이 $L_{f,tapered}$은 다음과 같다:

[0128] $$L_{f,tapered} = \int_0^{t_{f,tapered}} U(x)dt.$$

[0129] 다음 표는 테이퍼 추가로 인해 필요한 집속 거리가 감소하는 것을 설명하는 위에서 설명한 두 가지 예시 설계를 보고한다. 두 설계에서 최종 폭과 선형 유체 속도가 동일하므로 유량이 동일하여 설계를 비교할 수 있다.

표 10

[0130]

장치	내부 반경 Rc (mm)	높이 (μm)	초기 폭 (μm)	최종 폭 (μm)	초기 속도 (m/s)	최종 속도 (m/s)	L_f (mm)
기준 (테이퍼 없음)	25	150	628.4	628.4	0.796	0.796	160.8
비교 (테이퍼)	25	150	500	628.4	1	0.796	128.5

[0131] 주목할 점은 채널 확장으로 인한 외부 입자 이동 $U_M(x)$이 입자 집속으로 인한 내부 입자 이동 $U_D(x)$ 보다 클 경우, 유체 내 입자가 집속되지 않을 수 있다는 것이다. 일부 입자는 결국 내부가 아닌 외부로 끌리게 되기 때문이다. 일부 입자는 궁극적으로 내부가 아닌 외부로 당겨지기 때문에. 따라서 채널 폭의 확장 속도 k를 제한하는 것이 바람직 할 수 있으며, 이는 결국 입자 집속으로 인한 내부 입자 이동 $U_D(x)$에 비해 외부 입자 이동 $U_M(x)$을 제한한다.

[0132] 아래 표 11은 테이퍼링의 비율 k가 집속 길이 L_f에 미치는 영향을 보여준다. 이 예에서 유체는 물이다. 채널 높이는 입구와 출구 사이에서 일정하며 150 μm이고, 초기 채널 폭 w_0은 500 μm이다. 채널에는 25 mm의 일정한 내부 곡률 반경을 갖는 내벽이 있다. 채널을 통과하는 물의 초기 유체 속도는 1 m/s이다.

표 11

[0133]

k (mm/mm)	L_f (mm)
0.000	103.8
0.001	128.5
0.002	175.6
0.003	316.4
0.004	무한

[0134] k가 증가함에 따라, 집속 길이 L_f가 크게 증가한다는 점에 유의한다. 다양한 데이터 세트가 미세유체 채널의 작동 조건에 따라 검토되어, 다양한 테이퍼링 속도에서 집속 길이 L_f를 근사화했으며, k는 일반적으로 0.01 mm/mm 보다 작다. 일부 실시예에서 k는 0.007 mm/mm보다 작다. 일부 실시예에서 k는 0.005 mm/mm 이하이거나 심지어 0.004 mm/mm 이하이다. 미세유체 채널에 테이퍼가 포함되면, 일반적으로 테이퍼는 0 mm/mm보다 크다.

[0135] 위에서 보고된 테이퍼형 채널의 데이터는 채널 입구에서 채널 출구까지 테이퍼가 있는 채널에 관련된다. 일부 구현에서는 테이퍼링 비율 k가 0.004 mm/mm, 0.005 mm/mm, 0.007 mm/mm, 0.01 mm/mm 또는 심지어 0.016 mm/mm 보다 클 수 있으며, 이는 채널 중간(채널 입구와 채널 출구 사이)에서 출구 방향으로 테이퍼가 형성되는 경우에

해당한다. 테이퍼가 채널 끝 쪽에서 시작되는 구현에서는, 많은 입자가 이미 내벽 쪽으로 집속되어 있을 수 있으므로, 유체가 확장되는 채널을 채우더라도 입자가 외부로 크게 이동하지 않아 테이퍼링 속도가 상대적으로 증가할 수 있을 것으로 예상된다.

[0136] **예시 F**

[0137] 아래 표 12는 일정한 치수(높이 150 μm, 폭 500 μm, 곡률 반경 25 mm)를 갖는 채널과 동일한 높이 및 곡률 반경을 가지며 채널 길이의 마지막 1/4에서 폭이 500 μm에서 1000 μm(1 mm)로 두 배가 되는 테이퍼 형태의 채널을 비교한 결과를 나타낸다. 두 채널의 총 유체 볼륨 유량 분배는 비교적 일관성이 있지만(13/87 대 15/85), 테이퍼로 인해 내부 채널의 입자 유지율이 59 %에서 79 %로 상당히 증가하는 것이 관찰되었다.

표 12

[0138]

	% 흐름 내부 채널	% 입자 내부 채널
일정한 폭	13%	59%
테이퍼된 폭	15%	79%

[0139] **예시적 측면**

[0140] 측면 1. 기판; 및 채널 내에 액체를 수용하도록 구성되고, 입구 및 출구를 포함하며, 상기 기판에 의해 적어도 부분적으로 정의된 액체 채널;을 포함하고, 여기서, 상기 액체 채널은 중심 축 주위의 내부 반경을 정의하는 내벽과 중심 축 주위의 외부 반경을 정의하는 외벽을 포함하고, 상기 액체 채널은 상기 입구에서 상기 출구까지 상기 내벽을 따라 액체 채널 길이를 갖고, 상기 액체 채널은 상기 액체 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖고, 상기 직사각형 단면은 상기 내벽과 상기 외벽 사이에 채널 폭을 갖고, 상기 채널은 상기 출구를 향해 1 mm 액체 채널 길이 당 0.00 ~ 0.01 mm 사이에서 일정한 속도로 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역을 갖는 것을 특징으로 하는, 직경(a)의 분산된 입자를 갖는 액체를 분리하도록 구성된 유체역학적 분리기.

[0141] 측면 2. 측면 1 및 측면 3 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 테이퍼 영역이 상기 입구에서 상기 출구까지 연장되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0142] 측면 3. 측면 1 내지 측면 2 및 측면 4 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 내부 반경은 상기 입구로부터 상기 출구까지 일정한 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0143] 측면 4. 측면 1 내지 측면 3 및 측면 5 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 외부 반경은 상기 입구와 상기 출구 사이에서 바깥쪽으로 테이퍼되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0144] 측면 5. 측면1 내지 측면 4 및 측면 6 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 제1 채널 폭 및 제1 액체 채널 길이를 갖는 제1 영역, 제2 채널 폭 및 제2액체 채널 길이를 갖는 제2 영역 및 상기 제1 영역에서 상기 제2 영역으로 연장되는 테이퍼 영역 길이를 갖는 테이퍼 영역을 포함하는, 유체역학적 분리기.

[0145] 측면 6. 측면 1 내지 측면 5 및 측면 7 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 제1 영역은 상기 제2 영역보다 더 긴 길이를 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0146] 측면 7. 측면 1 내지 6 및 측면 8 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 분리기는 상기 제1 영역 및 상기 제2 영역에서 딘 번호(Dean number, De)가 5 내지 25 사이로 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0147] 측면 8. 측면 1 내지 측면 7 및 측면 9 내지 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 입자 직경(a)은 적어도 상기 제1 영역에서 유압 직경(D_H)의 8% 보다 큰 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0148] 측면 9. 측면 1 내지 측면 8 및 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 분리기는 액체보다 최대 3배 밀도의 입자를 분리하도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0149] 측면 10. 측면 1 내지 측면 9 및 측면 11 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 출구는 제1 출구 및 제2 출구를 포함하는, 유체역학적 분리기.

[0150] 측면 11. 측면 1 내지 측면 10 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 복수의 동일한 액체 채널 중 하나인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0151] 측면 12. 기판; 및 기판에 의해 적어도 부분적으로 정의되는 액체 채널;을 포함하고, 상기 액체 체널은 상기 채널 내에서 액체를 수용하도록 구성되고, 제1 출구 분기 및 제2 출구 분기를 포함하는 입구 및 출구를 갖는 것을 특징으로 하고,

[0152] 여기서, 상기 액체 채널은 중심 축을 중심으로 내부 반경을 정의하는 내벽과 중심 축을 중심으로 외부 반경을 정의하는 외벽을 갖고, 상기 액체 채널은 상기 내벽에서 상기 입구에서 상기 출구까지의 액체 채널 길이를 갖고, 상기 액체 채널은 상기 내벽과 상기 외벽 사이의 채널 폭을 갖고, 채널은 상기 출구 쪽으로 상기 채널 폭이 증가하는 테이퍼 영역을 포함하는,

[0153] 직경(a)의 분산된 입자를 갖는 액체를 분리하도록 구성된 유체역학적 분리기.

[0154] 측면 13. 측면 12 및 측면 14 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 테이퍼 영역은 상기 입구에서 상기 출구까지 연장되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0155] 측면 14. 측면 12 내지 측면 13 및 측면 15 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 내부 반경은 상기 입구에서 상기 출구까지 일정한 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0156] 측면 15. 측면 12 내지 측면 14 및 측면 16 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 외부 반경이 상기 입구와 상기 출구 사이에서 바깥쪽으로 테이퍼되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0157] 측면 16. 측면 12 내지 측면 15 및 측면 17 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 제1 채널 폭 및 제1 액체 채널 길이를 갖는 제1 영역, 제2 채널 폭 및 제2 액체 채널 길이를 갖는 제2 영역 및 상기 제1 영역에서 상기 제2 영역으로 연장되는 테이퍼 영역 길이를 갖는 테이퍼 영역을 포함하는, 유체역학적 분리기.

[0158] 측면 17. 측면 12 내지 측면 16 및 측면 18 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 제1 영역은 상기 제2 영역보다 더 긴 길이를 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0159] 측면 18. 측면 12 내지 측면 17 및 측면 19 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 분리기는 상기 제1 영역 및 상기 제2 영역에서 5내지 25 사이의 딘 수(De)를 가지도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0160] 측면 19. 측면 12 내지 측면 18 및 측면 20 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 입자 직경(a)은 적어도 상기 제1 영역에서 유압 직경(D_H)의 8%보다 큰 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0161] 측면 20. 측면 12 내지 측면 19 및 측면 21 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 분리기는 상기 액체보다 최대 3배 밀도의 입자를 분리하도록 구성되는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0162] 측면 21. 측면 12 내지 측면 20 및 측면 22 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 내부 반경이 10 ㎜ 이상 100 ㎜ 이하인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0163] 측면 22. 측면 12 내지 측면 21 및 측면 23 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 상기 기판에 의해 정의된 복수의 동일한 액체 채널 중 하나인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0164] 측면 23. 측면 12 내지 측면 22 및 측면 24 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 400 ㎛내지 1000 ㎛ 범위의 폭을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0165] 측면 24. 측면 12 내지 측면 23 및 측면 25 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 100 ㎛ 내지 500㎛ 범위의 높이를 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0166] 측면 25. 측면 12 내지 측면 24 및 측면 26 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 상기 액체 채널 길이를 따라 다각형 단면을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0167] 측면 26. 측면12 내지 측면 25 및 측면 27 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 상기 액체 채널 길이를 따라 직사각형 단면을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0168] 측면 27. 측면 12 내지 측면 26 및 측면 28 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널의 상기 채널 폭은 상기 액체 채널을 따라 1 ㎜ 액체 채널 길이당 10 ㎜를 넘지 않게 변하는 것을 특징으로 하는, 유

체역학적 분리기.

[0169] 측면 28. 측면 12 내지 측면 27 및 측면 29 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 채널 폭은 상기 테이퍼 영역에서 일정한 비율로 증가하는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0170] 측면 29. 측면 12 내지 측면 28 및 측면 30 내지 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 제1 채널 폭을 갖는 제1 영역 및 상기 제1 영역에서 상기 출구까지 증가하는 채널 폭을 갖는 테이퍼 영역을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0171] 측면 30. 측면 12 내지 측면 29 및 측면 31 중 임의의 어느 하나에 있어서, 상기 액체 채널은 복수의 테이퍼 영역을 포함하고, 각각은 상기 출구를 향해 증가하는 채널 폭을 갖는 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

[0172] 측면 31. 측면 12 내지 측면 30 중 임의의 어느 한 측면에 있어서, 상기 액체 채널은 미세유체 채널인 것을 특징으로 하는, 유체역학적 분리기.

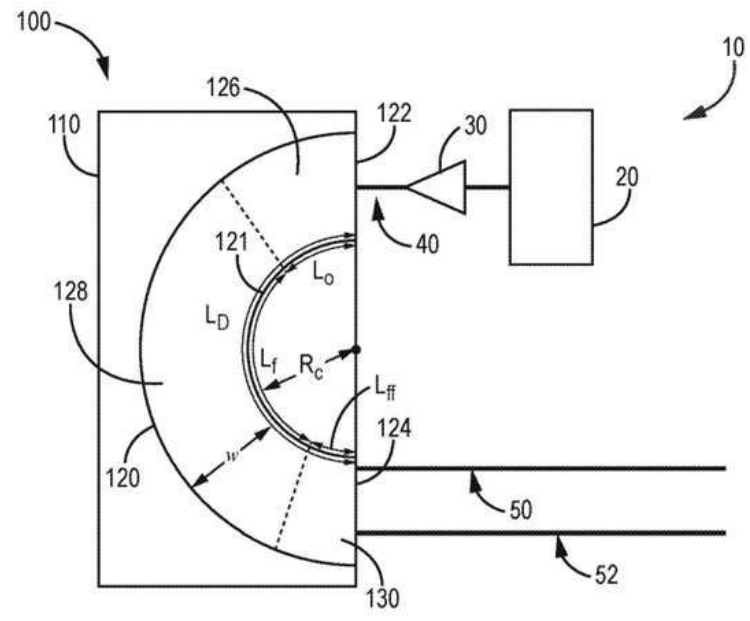
[0173] 또한, 이 명세서 및 첨부된 청구항에서 사용되는 "구성된"이라는 문구는 특정 작업을 수행하거나 특정 구성을 채택하도록 구성된 시스템, 장치 또는 기타 구조를 설명한다. "구성된"이라는 단어는 "배열된", "건설된", "제조된" 등과 같은 유사한 단어와 상호 교환하여 사용할 수 있다.

[0174] 본 명세서의 모든 출판물 및 특허 출원은 본 기술이 관련된 기술분야에서 통상의 기술 수준을 나타낸다. 모든 출판물 및 특허 출원은 각 개별 출판물 또는 특허 출원이 참조에 의해 구체적이고 개별적으로 표시된 것과 동일한 정도로 본 명세서에 참조에 의해 통합된다. 본 출원의 공개와 여기에 참조로 통합된 문서의 공개 사이에 불일치가 있는 경우, 본 출원의 공개가 우선한다.

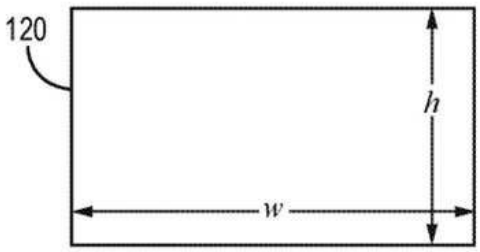
[0175] 본 출원은 본 주제의 적응 또는 변형을 다루기 위한 것이다. 상기 설명은 예시적인 것이지 제한적인 것이 아니며, 청구범위는 본 명세서에 기재된 예시적인 실시예에 한정되지 않음을 이해해야 한다.

도면

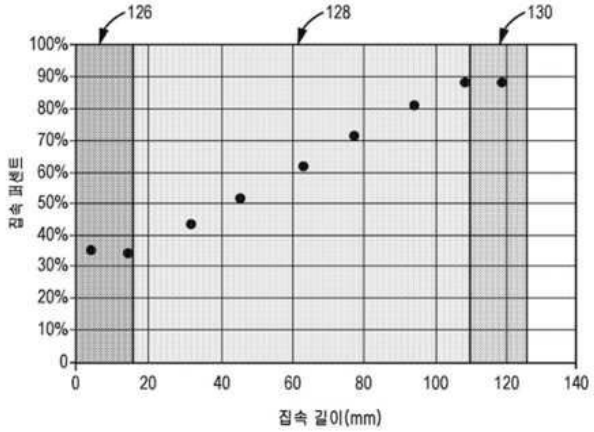
도면1



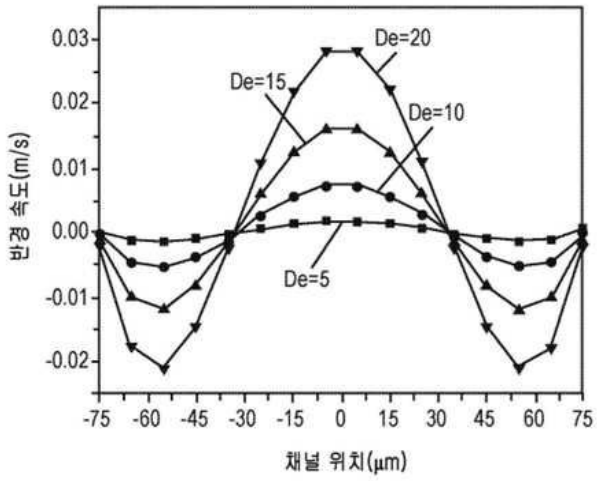
도면2


120
h
w

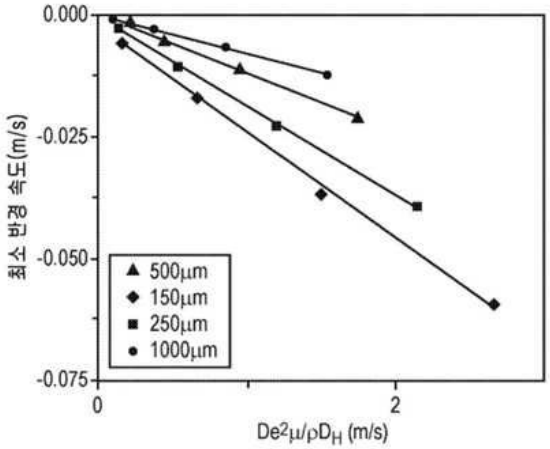
도면3


126
128
130
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0
집속 퍼센트
0
20
40
60
80
100
120
140
집속 길이(mm)

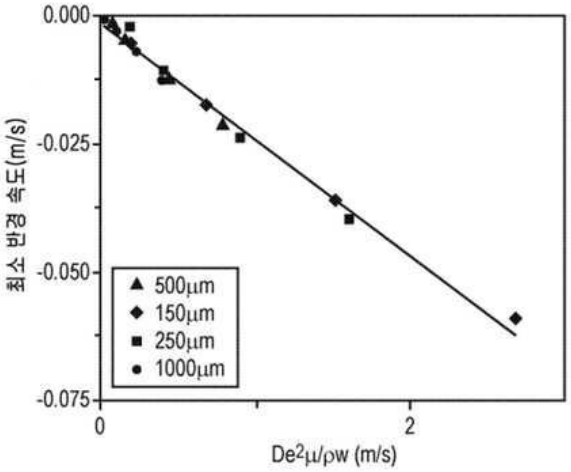
도면4


0.03
0.02
0.01
0.00
-0.01
-0.02
반경 속도(m/s)
De=20
De=15
De=10
De=5
-75
-60
-45
-30
-15
0
15
30
45
60
75
채널 위치(μm)

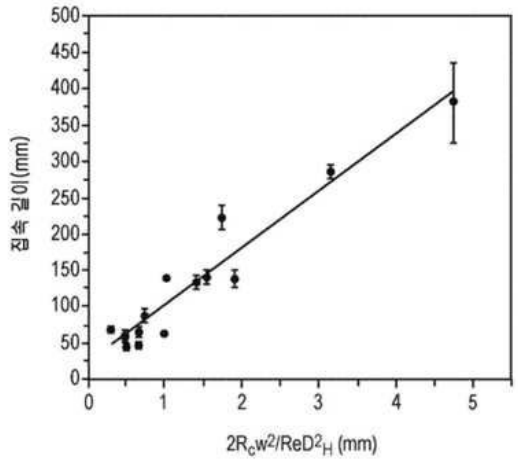
도면5


0.000
-0.025
-0.050
-0.075
최소 반경 속도(m/s)
500μm
150μm
250μm
1000μm
0
2
De²μ/ρD_H (m/s)

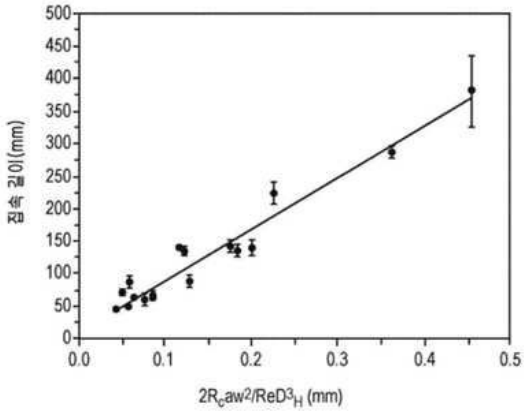
도면6


0.000
-0.025
-0.050
-0.075
최소 반경 속도(m/s)
500μm
150μm
250μm
1000μm
0
2
De²μ/ρw (m/s)

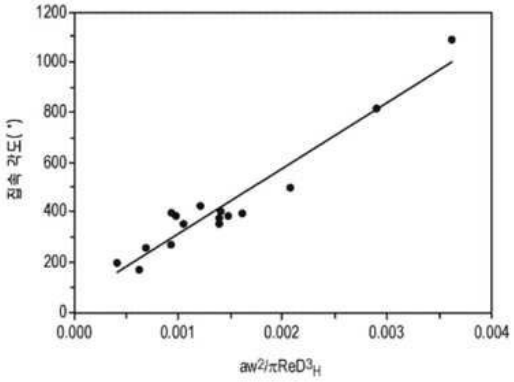
도면7


500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
집속 길이(mm)
0
1
2
3
4
5
2R_cw²/ReD²_H (mm)

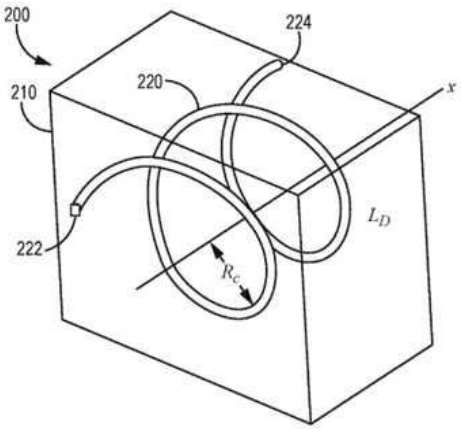
도면8


접속 길이(mm)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
2R$_c$aw^2/ReD^3_H (mm)

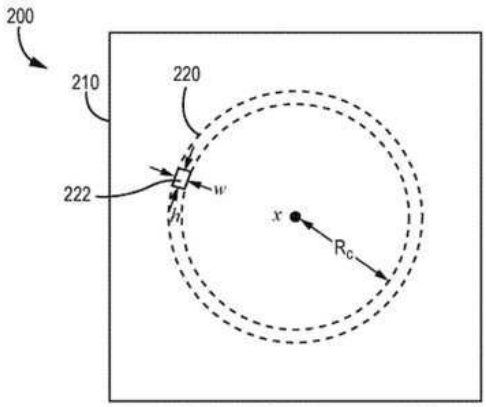
도면9


접속 각도(°)
1200
1000
800
600
400
200
0
0.000
0.001
0.002
0.003
0.004
aw^2/πReD^3_H

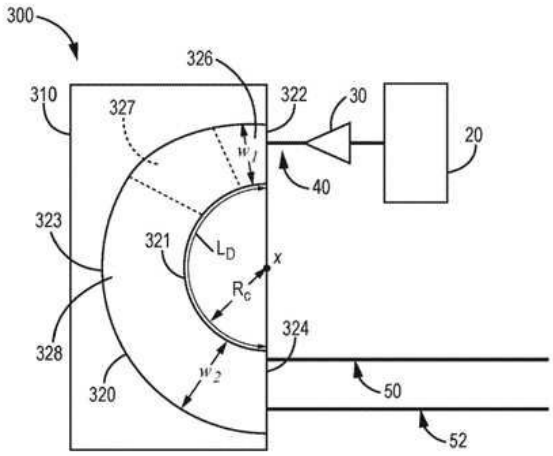
도면10


200
210
220
224
222
x
L_D
R_c

도면11



도면12



도면13

