



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0089724
(43) 공개일자 2009년08월24일

(51) Int. Cl.

B01J 19/10 (2006.01) *B01J 19/00* (2006.01)

(21) 출원번호 10-2008-0015045

(22) 출원일자 2008년02월19일

심사청구일자 2009년03월18일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자

양대륙

서울 성북구 길음1동 삼성래미안아파트 111동 1903호

장지웅

서울 성북구 돈암1동 삼성아파트 102동 2203호

(74) 대리인

현종철

전체 청구항 수 : 총 10 항

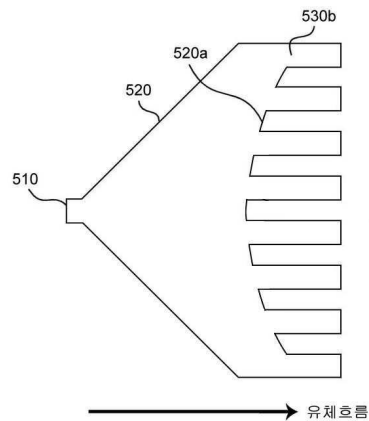
(54) 마이크로 반응기 및 이를 이용한 공정 시스템

(57) 요약

마이크로 반응기가 제공된다.

본 발명에 따른 마이크로 반응기는 유입채널; 상기 유입채널이 일 측의 중심에 연결되며, 상기 유입채널로부터 유입되는 유체를 평면상에서 분산시키는 발산채널; 및 상기 발산채널의 타 측에 연결되어 상기 발산 채널에서 분산되는 유체가 유입되는 마이크로 채널에 있어서, 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 먼 거리의 마이크로 채널의 유체이동길이는 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가까운 거리의 마이크로 채널의 유체이동길이보다 짧으며, 그 결과 본 발명에 따른 마이크로 반응기는 충분한 에너지 효율을 유지하면서 균일한 유속의 유체 전달이 가능하다. 따라서, 상기 마이크로 채널을 지나 혼합 영역으로 유입되는 반응물질은 각 마이크로 채널마다 동일한 열전달 및 물질 전달을 발생시키므로, 사용자의 공정 제어가 보다 용이하다.

대표도 - 도5a



특허청구의 범위

청구항 1

유입채널; 상기 유입채널이 일 측의 중심에 연결되며, 상기 유입채널로부터 유입되는 유체를 평면상에서 분산시키는 발산채널; 및 상기 발산채널의 타 측에 연결되어 상기 발산 채널에서 분산되는 유체가 유입되는 복수의 마이크로 채널에 있어서,

상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 먼 거리의 마이크로 채널의 유체 이동 길이는 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가까운 거리의 마이크로 채널의 유체 이동 길이보다 짧은 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 마이크로 채널 간의 유체 이동 길이의 차이는 상기 복수의 마이크로 채널의 유체 유입부 위치를 달리함으로써 달성하는 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 마이크로 채널은 사각형의 덕트 타입인 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 마이크로 채널에 유입되는 유체의 압력은 상기 마이크로 채널이 상기 발산 채널의 타 측 중심에 가까울수록 높으며, 이때 압력은 하기 식에 의하여 결정되는 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

$$\frac{dp}{dr} = \frac{3\mu Q}{4a^3 r \alpha}$$

(상기 식에서 μ 는 점도, Q 는 유량, a 는 발산채널이 갖는 높이의 1/2, α 는 유체 흐름 방향에 대하여 발산 채널의 일 면이 이루는 각이고, r 은 유입채널과의 마이크로 채널의 유체 유입부 사이의 거리)

청구항 5

제 1항에 있어서,

유체 흐름 방향을 기준으로 마이크로 채널과 유입채널 사이의 거리는 하기 식에 의하여 계산되는 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

$$\Delta P_f = 32\lambda_{NC} \frac{\mu L u_m}{D_H^2}$$

(상기 식에서 μ 는 점도, L 은 마이크로 채널의 길이, D_H 는 수력 직경, u_m 은 평균 유속이고, λ_{NC} 는 비-원형 인자)

청구항 6

제 1항에 있어서,

유체 흐름 방향을 기준으로 마이크로 채널과 유입채널 사이의 거리 및 상기 발산 채널의 타 측의 중심으로부터 가장 가까이 연결된 마이크로 채널과 유입채널 사이의 거리가 이루는 길이단차 x 는 하기 식에 의하

여 계산되는 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

$$x = \frac{3nw^3}{4\lambda_{NC}\alpha(e+w)^2} \ln\left(\frac{r'}{r'_{ref}}\right)$$

(상기 식에서 w 는 덕트의 너비, e 는 덕트의 두께, λ_{NC} 는 비-원형 인자, n 은 마이크로 채널의 수, α 는 유체 흐름 방향에 대하여 발산 채널의 일 면이 이루는 각, r'_{ref} 는 발산채널의 타 측의 중심으로부터 가장 가까운 거리의 마이크로 채널의 유입부와 유입채널 간의 거리이며, r' 은 돌출 거리 x 를 구하고자 하는 특정 마이크로 채널의 유체 유입부와 유입채널 간의 거리.)

청구항 7

제 1항에 있어서,

상기 유체는 라미나 유체인 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기.

청구항 8

제 1항 내지 제 7항 중 어느 한 항에 따른 마이크로 반응기를 하나 이상 포함하는 것을 특징으로 하는 공정 시스템.

청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 마이크로 반응기를 둘 이상 포함하며, 이때 상기 마이크로 반응기는 병렬적으로 구성된 것을 특징으로 하는 공정 시스템.

청구항 10

제 8항에 있어서,

상기 공정 시스템은 화학 또는 생물 공정에 적용될 수 있는 것을 특징으로 하는 공정 시스템.

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

<1> 본 발명은 마이크로 반응기 및 이를 이용한 공정 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는 높은 에너지 효율을 가지며 균일한 속도 분포를 가지는 마이크로 반응기 및 이를 이용한 공정 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

<2> 마이크로반응기란 전자산업의 발달과 함께 발전된 마이크로테크놀로지와 정밀 공학(Precision Engineering)을 적용하여 제작된 소형화 반응 시스템(Miniaturized reaction system)으로 정의될 수 있다. 마이크로반응기는 기본적으로 뛰어난 물질 및 열전달 특성, 균일한 유체흐름의 제공 등의 여러 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라 실험실 규모의 개발이 스케일-업(Scale-up)과정 없이 넘버링-업(Numbersing-up, 반응기 숫자를 단순히 병렬로 증가시킴) 개념을 적용하여 곧바로 상업생산규모로 적용 가능하다는 점에서 소량다품종이 대부분인 정밀화학분야에서 큰 주목을 받고 있다. 정밀화학공정에 마이크로반응기를 적용 시 화학반응의 측면에서는 다음과 같은 여러 가지의 장점을 기대할 수 있다. 첫 번째는 마이크로반응기는 혼합효율이 매우 뛰어난 연속장치로서 균일한 반응물 비율 유지 및 부반응 억제 등으로 수율 및 순도의 증대를 기대할 수 있다. 두 번째는 매우 빠른 열교환으로 국부적인 고온점(hot spot)의 생성이 억제되어 부산물의 생성을 최소화하여 반응의 선택성을 높일 수 있다. 세 번째는 미세한 연속공정으로 초정밀 공정제어가 가능하다는 점이다. 네 번째는 안전성의 측면으로 독성이 있거나 폭발성이 있는 반응물을 사용함에 있어서 안전한 공정을 제공한다. 그 외에도 상업적

적용 측면에서 이미 언급한 바와 같이 정밀화학제품의 상업화 과정 중 큰 부담중의 하나인 스케일-업 과정이 필요 없이 바로 상업화 적용이 가능하다는 점이며, 또한 생산규모의 조절이 용이하여 시장상황에 손쉽게 대응가능하고, 장소적 측면에서도 넓은 공간이 필요하지 않고 좁은 공간에서도 설치가 용이하여 필요한 장소에 손쉽게 장비를 설치하여 사용할 수 있는 등 여러 가지 장점을 기대할 수 있다. 이러한 여러 장점이 기대되는 마이크로 반응기를 활용하여 화학 및 생물 공정 개발에 이용하고자하는 시도가 최근 꾸준히 확산되고 있다(Wolfgang Ehrfeld, Volker Hessel, Holger Lowe, Microreactors, Wiley-VCH, Weinheim, 2000).

<3> 즉, 복수의 병렬반응기를 설치하여 반응을 시킴으로써 상술한 마이크로 반응기의 장점을 효과적으로 달성할 수 있기 때문에, 마이크로 반응기로 복수의 채널을 가지는 마이크로채널형의 병렬 반응기가 널리 사용된다. 이러한 마이크로채널 반응기의 일 방식으로 매니폴드형의 마이크로채널 반응기가 있는데, 이는 도 1에 나타난다.

<4> 도 1을 참조하면, 일반적인 매니폴드형 마이크로채널 반응기는 유입채널이 매니폴드의 일측에 결합하고, 상기 매니폴드의 타측에는 복수의 마이크로 채널이 결합하는 구조를 갖는다. 상기 구조에 의하면, 유입채널에서 유입되는 유체는 매니폴드를 거치면서 마이크로채널로 분산, 유입된다. 이러한 마이크로채널 반응기에서 마이크로채널에서의 유속 제어는 추후 혼합 효율 및 열 전달과 같은 마이크로 반응기의 효과를 달성하는데 매우 중요하다. 즉, 유속의 불균일한 분포는 수율 및 선택도 등에 있어서 마이크로 반응기의 성능에 영향을 줄 수 있고, 또한 물질 전달 상수의 큰 변화를 초래하고, 해당 설계 수치에서의 체류 시간 역시 변화시키게 된다. 하지만, 종래의 일반적인 마이크로채널 반응기는 유입채널과 먼 거리의 마이크로채널에서의 유속이 가까운 쪽의 마이크로채널의 유속보다 느려지는데, 이것은 거리 및 유입되는 유체와 매니폴드의 타측간의 저항의 증가에 의한 압력강하에 기인하는 것이다.

<5> 또 다른 마이크로채널 반응기의 일례로서 유입채널과 마이크로 채널 사이에 제공되는 큰 용적의 유입 챔버를 포함하는 마이크로 반응기가 있다.

<6> 도 2는 유입챔버를 구비하는 종래의 마이크로 반응기에 대한 단면도이다.

<7> 도 2를 참조하면, 유입채널(210)과 마이크로 채널(230)사이에는 큰 용적의 유입챔버(220)가 존재하며, 이러한 유입챔버는 유입되는 유체에 대하여 큰 체체시간을 제공하고, 이로써 유입채널(210)과 마이크로 채널(230)사이의 압력 강하를 감소시키게 된다. 하지만, 이 경우에도 유입채널(210)로부터 먼 거리의 마이크로 채널로 유입되는 유체는 가까운 거리의 마이크로 채널에 비하여 여전히 큰 압력강하를 가지게 되며, 그 결과 각 마이크로 채널간에 흐르는 유체는 균일하지 못한 유속을 가지게 된다. 더 나아가, 이러한 유입챔버(220)에서 유체의 직접적인 경로에 해당하지 않는 영역(220a, 220b)에서는 유체의 흐름이 발생하기 않게 되어, 반응물의 침전과 같은 문제가 발생할 수 있다.

<8> 도 3은 이러한 침전의 문제를 방지하기 위한 마이크로 반응기에 대한 단면도이다.

<9> 도 3을 참조하면, 유입 챔버(320)는 유입채널(310)로부터 마이크로 채널(330)쪽으로 갈수록 단면적이 일정하게 커지는 방사형 구조를 갖는다. 즉, 종래의 유입 챔버(320)에서 유체의 흐름이 발생하지 않아 정체(stagnation)되는 영역을 유입 챔버로부터 제거하여, 유입 챔버(320)의 모든 영역에서 유체의 흐름이 발생한다. 하지만, 이 경우에도 유입채널로부터 각 마이크로 채널까지의 거리가 상이하므로, 마이크로 채널에 유입되는 유체의 유속은 각각의 마이크로 채널마다 상이하며, 이것은 마이크로 반응기 효율을 떨어뜨린다.

<10> 이러한 마이크로 반응기의 유속 제어를 위한 다양한 형태의 반응기가 개시되고 있는데, C. Amador는 복수의 병렬 구조를 갖는 반응기를 개시하고 있다(C. Amador, A. Gavriilidis, P. Angeli, *Flow distribution in different microreactor scale-out geometries and the effect of manufacturing tolerances and channel blockage*, Chemical Engineering Journal 101(2004) 379-390).

<11> 도 4는 Amador에 의하여 개시되는 반응기의 단면도이다.

<12> 도 4를 참조하면, 유입채널(410)로부터 유입되는 유체는 복수의 단계를 거치면서 다수의 마이크로 채널(420)로 흐르게 된다. 즉, Amador에 의하여 개시되는 마이크로 반응기는 유입 챔버를 제거하는 대신 유입되는 유체를 2개 유로로 분할(split)하는 단계를 복수 배치함으로써, 유체 경로의 거리를 동일하게 함과 동시에 다수의 마이크로 채널을 형성할 수 있다. 하지만, 이 경우 흐르는 유체는 많은 수의 분할과정을 통하여 많은 에너지 손실을 가져올 수 있으며, 이는 비경제적이다.

<13> 상기 살펴본 바와 같이 마이크로 반응기, 특히 복수의 마이크로채널을 구비하는 마이크로 반응기에서

충분한 에너지 효율을 가지고 상기 마이크로채널의 유속을 균일하게 할 수 있는 마이크로 반응기는 현재까지 개시되어 있지 못하는 실정이다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

<14> 따라서, 본 발명이 이루고자 하는 첫 번째 과제는 높은 에너지 효율을 가지며 동일한 속도와 압력 프로파일을 갖는 마이크로 반응기를 제공하는 데 있다.

<15> 또한, 본 발명이 이루고자 하는 두 번째 과제는 상기 마이크로 반응기를 이용한 화학 공정 시스템을 제공하는 데 있다.

과제 해결수단

<16> 상기 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 유입채널; 상기 유입채널이 일 측의 중심에 연결되며, 상기 유입채널로부터 유입되는 유체를 평면상에서 분산시키는 발산채널; 및 상기 발산채널의 타 측에 연결되어 상기 발산 채널에서 분산되는 유체가 유입되는 복수의 마이크로 채널에 있어서,

<17> 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 먼 거리의 마이크로 채널의 유체 이동 길이는 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가까운 거리의 마이크로 채널의 유체 이동 길이보다 짧은 것을 특징으로 하는 마이크로 반응기를 제공한다.

<18> 상기 형태의 마이크로 반응기에서 복수의 마이크로 채널이 갖는 유체 이동 길이의 차이는 상기 복수 마이크로 채널이 가지는 유체 유입부의 위치를 달리함으로써 달성할 수 있다.

<19> 또한, 상기 마이크로 채널은 사각형의 덕트 타입이며, 상기 마이크로 채널에 유입되는 유체의 압력은 상기 마이크로 채널이 상기 발산 채널의 타 측 중심에 가까울수록 높으며, 이때 압력은 하기 식에 의하여 결정된다.

$$\frac{dp}{dr} = \frac{3\mu Q}{4a^3 r \alpha}$$

<20>

<21> (상기 식에서 μ 는 점도, Q 는 유량, a 는 발산채널이 갖는 높이의 1/2, α 는 유체 흐름 방향에 대하여 발산 채널의 일 면이 이루는 각이고, r 은 유입채널과의 마이크로 채널의 유체 유입부 사이의 거리)

<22> 또한, 상기 마이크로 채널에서 하기 식에 따라 유체의 압력 강하가 일어나며,

$$\Delta P_f = 32\lambda_{NC} \frac{\mu L u_m}{D_H^2}$$

<23>

<24> (상기 식에서 μ 는 점도, L 은 마이크로 채널의 길이, D_H 는 수력 직경, u_m 은 평균 유속이고, λ_{NC} 는 비-원형 인자)

<25> 또한, 유체 흐름 방향을 기준으로 마이크로 채널과 유입채널 사이의 거리 및 상기 발산 채널의 타 측의 중심으로부터 가장 가까이 연결된 마이크로 채널과 유입채널 사이의 거리가 이루는 길이 단차 x 는 하기 식에 의하여 계산된다.

$$x = \frac{3nw^3}{4\lambda_{NC}\alpha(e+w)^2} \ln\left(\frac{r'}{r'_{ref}}\right)$$

<26>

<27> (상기 식에서 w 는 마이크로 채널의 너비, e 는 마이크로 채널의 두께, λ_{NC} 는 비-원형 인자, n 은 마이크

로 채널의 수, α 는 유체 흐름 방향에 대하여 발산 채널의 일 면이 이루는 각, r'_{ref} 는 발산채널의 타 측의 중심으로부터 가장 먼 거리의 마이크로 채널의 유입부와 유입채널 간의 거리이며, r' 는 마이크로 채널의 유체 유입부와 유입채널 간의 거리임)

<28> 또한, 상기 마이크로 반응기 내의 유체는 라미나 유체이다.

<29> 상기 두 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 상기 형태의 마이크로 반응기를 하나 이상 포함하는 공정 시스템을 제공한다.

<30> 본 발명에 따른 공정 시스템은 상기 마이크로 반응기를 둘 이상 포함하며, 이때 상기 마이크로 반응기는 병렬적으로 구성될 수 있다. 또한, 본 발명에 따른 공정 시스템은 화학 또는 생물 공정에 적용될 수 있다.

효 과

<31> 본 발명은 충분한 에너지 효율을 유지하면서, 마이크로채널의 유속을 균일하게 할 수 있는 구조의 마이크로 반응기를 제공할 수 있으며, 그 결과 상기 마이크로 채널을 지나 혼합 영역으로 유입되는 반응물질은 각 마이크로 채널마다 동일한 열전달 및 물질 전달을 발생시키므로, 사용자의 공정 제어가 보다 용이하다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

<32> 본 발명은 유입채널; 상기 유입채널이 일 측의 중심에 연결되며, 상기 유입채널로부터 유입되는 유체를 평면상에서 분산시키는 발산채널; 및 상기 발산채널의 타 측에 연결되어 상기 발산 채널에서 분산되는 유체가 유입되는 마이크로 채널에 있어서, 유체 흐름 방향을 기준으로 할 때, 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 먼 거리의 마이크로 채널과 상기 유입채널 사이의 거리는 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가까운 거리의 마이크로 채널과 상기 유입채널 사이의 거리보다 더 짧은 것을 특징으로 마이크로 반응기를 제공한다.

<33> 이하 도면을 이용하여 본 발명에 따른 마이크로 반응기를 보다 상세히 설명한다.

<34> 도 5a 및 5b는 본 발명에 따른 상기 마이크로 반응기를 나타내는 단면도 및 사시도이다.

<35> 도 5a 및 5b를 참조하면, 상기 마이크로 반응기는 유입채널(510)과 상기 유입채널이 일 측에 연결하여 상기 유입채널(510)로부터 유입되는 유체를 보다 넓은 면적으로 분산시키는 부채꼴 형태의 발산채널(diverging channel, 520)을 포함하며, 상기 발산채널(520)의 타 측으로는 복수의 마이크로 채널(530)이 연결된다.

이때, 상기 마이크로 반응기는 평면 마이크로 반응기이므로, 유입되는 유체의 수직이동은 없으며, 상기 발산채널(520)에서 유입되는 유체는 일차원적으로 확산, 분산되는데, 이는 아래에서 보다 상세히 설명된다.

<36> 상기 발산채널(520)을 상세히 설명하면, 상기 발산 채널(520)은 침전(stagnation) 등과 같은 문제를 피하기 위하여 상기 유입채널(510)로부터 상기 복수의 마이크로 채널(530)까지 균일한 경사를 갖는 부채꼴 형태가 바람직하다. 이로써, 반응기 구조에 따른 유체의 압력강하가 최소한으로 유지될 수 있다.

<37> 또한 본 발명에 따른 마이크로 반응기의 마이크로 채널을 살펴보면, 마이크로 반응기 타 측(520a)의 중심에 가까운 거리에 연결된 마이크로 채널의 유입부(530a)보다 상기 타 측(520a) 중심에 먼 거리에 연결된 마이크로 채널의 유입부(530b)는 더 짧은 유체 이동길이를 가지는데, 본 발명에서는 상기 마이크로 채널의 유출부의 위치는 평행하게 하는 대신에 발산채널에서 유체가 유입되는 유입부의 위치를 달리함으로써 이러한 유체 이동길이를 달리하였다.

<38> 즉, 본 발명에 따른 마이크로 반응기의 마이크로 채널은 상기 발산 채널의 타측 중심으로부터 멀리 위치한 마이크로 채널이 중심에 가까이 위치한 마이크로 채널에 비하여 유체 흐름 방향을 기준으로 유입 채널로부터 더 멀리 떨어져 있는 형태를 가지며, 그 결과 상기 발산 채널의 타 측 중심으로부터 멀어질수록 마이크로 채널은 보다 짧은 길이를 가지게 되고, 그 결과 유체의 이동길이가 짧아진다.

<39> 그 결과 본 발명은 상술한 보다 긴 경로의 마이크로 채널(중심쪽)이 갖는 보다 큰 압력 강하를 이용하여 마이크로 채널 간의 유속을 동일하게 분포시키게 되는데, 이를 위하여 본 발명에서는 상기 복수의 마이크로 채널의 각 유입부에서는 유체 압력이 상이하다는 점을 이용한다. 즉, 본 발명에 따른 마이크로 반응기에서의 유체의 압력은 상기 유입채널로부터 가까운 거리일수록 높으므로, 본 발명에 따른 마이크로 채널 구성에 있어서, 내측 마이크로 채널의 유입부는 외측 마이크로 채널 유입부에 비하여 높은 압력을 갖는다. 따라서, 본 발명은 이러한 내측 마이크로 채널 유입부의 높은 압력과 외측 마이크로 채널 유입부가 갖는 낮은 압력이 갖는 압력 차이를 상기 마이크로 채널간의 경로차이에 의하여 보상하는 것을 기술적 특징으로 하며, 그 결과 마이크로 채널

들 간의 압력차는 없어지고, 동일한 압력을 갖게 된다.

<40> 따라서, 각 마이크로 채널이 동일 위치에서 갖게 되는 동일 압력은 결국 마이크로 채널로부터 유출되는 유체 유량을 동일하게 하며, 사용자의 효과적인 공정 제어를 가능하게 한다.

<41> 또한, 동일한 유속 및 유량을 갖는 본 발명의 마이크로 반응기를 응용한 공정 시스템이 가능한데, 이러한 공정은 화학 또는 생물 공정일 수 있다.

<42> 이러한 공정 시스템의 일 예로, 하나의 마이크로 반응기를 사용하는 경우 동일한 유속을 갖는 복수의 마이크로 채널 각각에 대하여 상이한 반응(이것은 예를 들면 각각의 마이크로 채널을 흐르는 공통의 반응물에 각기 상이한 또 다른 반응물을 혼합함으로써 달성될 수 있다)을 일으켜, 마이크로 채널마다 상이한 결과물을 얻는 공정 시스템이 가능하다.

<43> 또 다른 예로서, 본 발명에 따른 마이크로 반응기를 복수개 병렬적으로 설치한 공정 시스템 또한 가능하다. 하지만, 어떠한 경우에도, 본 발명에 따른 공정 시스템은 전체 화학 반응에 있어 일정한(homogeneous) 반응물 유입 및 혼합이 가능하다는 장점을 갖는다.

<44> 이와 같이 모든 마이크로 채널에서 동일한 유속을 갖는 마이크로 반응기의 구성에 있어서, 각 마이크로 유입부의 압력 및 마이크로 채널에서의 압력강하를 구하는 것은 매우 중요하며, 이하 상세히 설명한다.

<45>

<46> 마이크로 채널 유입부 압력

<47> 본 발명에 따른 발산 채널은 실린더(r, θ, a)함수의 구조로 설명될 수 있다.

<48> 도 6a 내지 6c는 본 발명의 발산 채널에 대한 함수를 표시한 발산채널의 전면도, 측면 단면도이다.

<49> 도 6a를 참조하면, r 은 유입채널로부터의 거리를 나타내며, θ 는 발산채널의 중심축으로부터의 각을 의미하며, a 는 발산채널의 중심축과 발산채널의 외면이 이루는 각을 의미한다.

<50> 또한, 도 6b 및 6c를 참조하면, 상기 발산 채널의 외면(600a, 600b)이 이루는 각은 $2a$ 이고, 발산채널의 수직 높이(z)는 $2a$ 로 정의된다. 또한, 상기 높이(z)가 0이 되는 지점은 발산 채널의 중간으로 설정한다.

<51> 상기 발산 채널의 벽에 접한 곳의 유체는 정지된 것으로서, 즉, 노-슬립(no-slip)상태라 할 수 있다. 더 나아가, z 축에서 채널의 높이는 다른 축의 길이 스케일과 비교하여 상대적으로 작은 차수 범위를 가지므로, 충분히 유체가 흘렀을 때의 z 축 방향으로의 속도 분포는 포물선 형태를 나타낸다. 또한, 상기 발산채널에서의 유체는 완전한 구배를 나타내게 되는데, 유체 입자들의 수직(z 축방향)으로의 속도는 0이며, θ 방향으로의 속도 또한 0이다($v_\theta = v_z = 0$).

<52> 이러한 실린더형에서 연속방정식은 하기 수학식 1과 같다.

수학식 1

<53>
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0$$

<54> 즉, $r v_r$ 은 r 에 대하여 독립적이고, 또한 v_r 은 z -축 방향에서 포물선형을 나타내므로, 상기 수학식 1은 $r v_r = \theta$ 의 함수, $z = f(\theta)(a^2 - z^2)$ 라는 식으로 병합될 수 있다.

<55> 상기 $f(\theta)$ 는 Navier-Stokes 방정식의 해에 의하여 결정되며, 상기 경계 상태에서부터, 측벽에서의 속도는 0이 되므로, $\theta = a: f(+a) = f(-a) = 0$ 이 된다.

<56> 유속은 하기 수학식 2 의하여 결정된다.

수학식 2

$$Q = \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} r v_r dz d\theta = \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} f(\theta)(a^2 - z^2) dz d\theta$$

<57>

<58>

상기 수학식 2로부터 주어진 Q에 대한 $f(\theta)$ 를 특정할 수 있는데, 여기에서 꼭지점으로부터 발산(diverge)하는 유체는 양(+)의 값을 나타내고, 꼭지점을 향하여 수렴하는 유체는 음(-)의 값을 나타낸다. 따라서, 상기 수학식 2에 의하여 정의되는 Q가 양의 값이면 이는 유체의 유출(outflow)을 나타내며, 음의 값이면 유체의 유입(inflow)을 나타낸다.

<59>

$\frac{\partial}{\partial t} = 0$,
 $v_\theta = 0$ 이고 일 때 Navier-Stokes 방정식의 r 및 θ 요소는 하기 수학식 3으로 표시된다.

수학식 3

$$\rho v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right]$$

<60>

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta}$$

<61>

<62>

$r v_r$ 에 대한 상기 수학식을 치환하면, 아래의 수학식 4가 얻어진다.

수학식 4

$$- \rho (a^2 - z^2)^2 \frac{f^2}{r^3} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{r^3} (a^2 - z^2) \frac{d^2 f}{d\theta^2} - \frac{2\mu}{r} f$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{2\mu}{r^2} (a^2 - z^2) \frac{df}{d\theta}$$

<63>

<64>

압력을 제거하기 위하여, θ 에 대하여 상기 수학식 4의 첫 번째 식을 미분하였고, r에 대하여 두 번째 식을 미분하였으며, 그 결과는 아래의 수학식 5에 나타난다.

수학식 5

$$- \frac{2\rho}{r^3} (a^2 - z^2) f \frac{df}{d\theta} = - \frac{\partial^2 p}{\partial \theta \partial r} + \frac{\mu}{r^3} (a^2 - z^2) \frac{d^3 f}{d\theta^3} - \frac{2\mu}{r} \frac{df}{d\theta}$$

$$0 = - \frac{\partial^2 p}{\partial \theta \partial r} - \frac{4\mu}{r^3} (a^2 - z^2) \frac{df}{d\theta}$$

<65>

<66>

상기 식으로부터 하기 수학식 6을 얻을 수 있다.

수학식 6

$$\frac{2\rho}{\mu} (a^2 - z^2) f \frac{df}{d\theta} + \frac{d^3 f}{d\theta^3} - \left(\frac{2r^2}{a^2 - z^2} - 4 \right) \frac{df}{d\theta} = 0$$

<67>

<68>

이것은 상기 정의된 $f(\theta)$ 에 대한 세 가지 조건을 필요로 하는 제 3차 상미분 방정식이며, 이것은 독립, 비독립변수를 나타내는 데 있어 유용하다. 무차원화 된 각 Φ , 무차원화 된 유속 변수 F, 및 무차원화 된 채널 높이 ζ 는 하기와 같이 정의된다.

$$\Phi = \frac{\theta}{\alpha}$$

$$F = \frac{\alpha a f}{Q}$$

$$\zeta = \frac{z}{a}$$

<69>

<70> Φ 는 -1 및 +1 사이의 범위에 있으며, 수학식 6 및 경계 및 표면 상태에 관한 상기 수학식 2 등은 하기의 수학식 7이 된다.

수학식 7

$$R(1-\zeta^2)F\frac{dF}{d\Phi} + \frac{d^3F}{d\Phi^3} - k_r^2\alpha^2\frac{dF}{d\Phi} = 0$$

$$F(-1) = F(+1) = 0$$

$$\int_{-1}^1 F(\Phi) d\Phi = \frac{3}{4a^2}$$

$$R = \frac{2\rho Qa}{\mu}$$

$$k_r = \sqrt{\frac{2r^2}{a^2(1-\zeta^2)} - 4}$$

<71>

<72> 여기에서 R은 점도 스트레스(μQ 의 차수)에 대한 관성(ρQ^2) 비를 나타내며, 이것은 레이놀즈 수와 유사한 역할을 수행한다. R은 또한 유출되는 유체인지 또는 유입되는 유체인지에 따라 양(+)의 값을 갖거나 음(-)의 값을 갖는다. 또한, $\rho Qa/\mu \rightarrow 0$ 일 때, R은 0이 된다.

<73> 이러한 발산 채널에서 채널 높이는 r과 비교하여 볼 때 상대적으로 적으며, 따라서 꼭지점 부근을 제외하고는 k_r 은 +값을 갖는다.

<74> F와 Φ 는 단위 크기 차수를 가지며, 더 나아가, F에서의 변화는 크기 차수 단위이고, 이것은 단위 차수의 Φ 변화에 따라 나타난다. 따라서, 변수 F는 단위 크기 차수 f로 예상된다. 상기 수학식 7의 첫 번째 방정식에 나타난 각각의 F는 $k_r a$ 또는 R을 곱한 단위 차수를 가지며, 이로써 $k_r a$ 및 R은 상기 수학식 7의 첫 번째 방정식에서의 각 변수의 상대적 중요도를 결정할 수 있다.

<75> 마이크로 반응기의 발산 채널에서, R의 각 부분의 크기 차수(order of magnitude)는 SI단위로 $10^{-3} < \frac{\rho}{\mu} < 10^{-8}$, $Q = u_m A_{cs} < 10^{-5}$, $10^{-6} < a < 10^{-3}$, 이 된다.

<76> 대부분의 화학 또는 생물학적 반응에서, 유체의 속도는 아음속에 비하여 상당히 느리므로, R의 물리량 차수는 단위수치보다 상당히 작다. 이와 같이 R이 상대적으로 매우 작으므로, 상기 수학식 7의 첫 번째 방정식의 R에 0을 대입하여서 얻어지는 해는 무시하여도 좋을 수준의 오차를 갖는다. 이와 같은 방식으로 얻어진 방정식은 하기 수학식 8과 같다.

수학식 8

$$R=0: \frac{d^3 F}{d\Phi^3} - k_1^2 \alpha^2 \frac{dF}{d\Phi} = 0$$

<77>

<78> 이제, 비선형 방정식인 상기 수학식 7의 첫 번째 방정식이 선형 방정식인 수학식 7의 두 번째 방정식이 되며, Φ 에 대하여 독립적인 계수를 갖게 되며, 일반식은 하기 수학식 9와 같다.

수학식 9

$$F(\Phi) = A + B \cosh(k_r \Phi) + C \sinh(k_r \Phi)$$

<79>

<80> 수학식 7의 두 번째 및 세 번째 식의 항으로부터, 수학식 9의 방정식은 하기 수학식 10으로 정리될 수 있다.

수학식 10

$$R=0: F(\Phi) = \frac{3k_r \alpha}{8a^2} \frac{\cosh(k_r \alpha \Phi) - \cosh(k_r \alpha)}{\sinh(k_r \alpha) - k_r \alpha \cosh(k_r \alpha)}$$

<81>

<82> 또한, 상기 수학식 10은 하기의 방정식으로 바꾸어 정리할 수 있다.

수학식 11

$$f(\theta) = \frac{3k_r Q}{8a^3} \frac{\cosh(k_r \theta) - \cosh(k_r \alpha)}{\sinh(k_r \alpha) - k_r \alpha \cosh(k_r \alpha)}$$

$$rv_r = f(\theta)(a^2 - z^2) = \frac{3k_r Q}{8a^3} (a^2 - z^2) \frac{\cosh(k_r \theta) - \cosh(k_r \alpha)}{\sinh(k_r \alpha) - k_r \alpha \cosh(k_r \alpha)}$$

<83>

<84> 반응기가 긴 거리를 갖는 경우 수직 운동은 존재할 수 없으며, 압력 강하를 계산할 때 중력에 의한 영향도 무시될 수 있다. 따라서, 수학식 5를 적분함으로써 압력을 얻을 수 있다. 하지만, 수학식 5의 각 항이 갖는 크기 차수를 고려하여 볼때, 압력은 간단히 얻을 수 있는데, 먼저 수학식 5의 첫 번째 방정식은 하기 수학식 12와 같이 정리될 수 있다.

수학식 12

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho(a^2 - z^2)^2 \frac{f^2}{r^3} + \frac{\mu}{r^3} (a^2 - z^2) \frac{d^2 f}{d\theta^2} - \frac{2\mu}{r} f$$

<85>

<86> 수학식 12의 각 항이 갖는 크기 차수 또는 범위(SI 단위)는 각각

<87> $\rho < 10^3$, $10^{-6} < a < 10^{-3}$, $1 < \frac{Q}{a} < 10^{-2}$, $10^{-6} < \mu < 10^{-3}$, $r < 10^{-1}$ 이다. 따라서, 상기 식의 우변의 첫 번째 및 두 번째 항은 상기 수학식 12의 세 번째 항보다 각각 10^{-7} 및 10^{-6} 정도 적다. 따라서, 수학식 5의 두 번째 식에 따른 θ 방향의 압력 강하의 차수는 10^{-5} 보다 적다.

<88> 따라서, 3-방향에서의 개략적인 압력 강하는 하기 수학식 13과 같이 정리될 수 있다.

수학식 13

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{2\mu}{r} f(\theta) = -\frac{3\mu k_r Q}{4a^3 r} \frac{\cosh(k_r \theta) - \cosh(k_r \alpha)}{\sinh(k_r \alpha) - k_r \alpha \cosh(k_r \alpha)}$$

<89>

<90> 상기 수학식으로부터 발산 챔버가 갖는 등압선은 상기 발산 챔버의 유입부(유입채널이 연결되는 지점)로부터의 거리 r 이 반지름이 되는 원호모양을 갖는다. 크기 차수 분석으로부터 상기 발산 챔버에서의 r -방향에서의 압력강하는 압도적이며, 따라서 θ -방향에서의 압력은 $\theta=0$ 의 경우와 동일한 것으로 가정될 수 있다. 비록 $f(\theta)$ 가 r, k 로 표시되지 않고, r 의 함수로 표시되지만, 임의의 r, k 에 대하여도 양의 값을 가져야하므로, k_r 은 k_∞ 로 대체될 수 있다. 그 결과 상기 수학식 13은 하기의 수학식 14로 간단히 정리될 수 있다.

수학식 14

$$\frac{dp}{dr} = \frac{3\mu Q}{4a^3 r \alpha}$$

<91>

<92> 마이크로 채널에서의 압력 강하

<93> 상술한 방법을 통하여 유입부로부터 거리 r 의 위치에 있는 마이크로 채널 유입부의 압력을 구할 수 있다.

<94> 따라서, 상기 마이크로 채널 유입부로부터 마이크로 채널로 흐르는 유체에 대하여 발생하는 유체의 압력을 유동 거리에 관하여 구할 필요가 있으며, 이는 하기 상세히 설명된다.

<95> 본 압력강하의 관계식은 모두 상기 마이크로 채널을 흐르는 유체가 라미나 유체임을 전제하며, 상기 마이크로 채널이 원형인 경우 평균 속도 u_m 을 갖는 라미나 유체의 압력강하는 Hagen-Poiseuille 방정식을 사용하여 측정할 수 있다. 하지만, 비-원형 채널은 비-원형 인자 λ_{NC} 와 함께 채널 수력 직경 D_H 는 압력 강하 계산을 위한 Hagen-Poiseuille 방정식에 포함되어야 할 필요가 있는데, 여기에서 λ_{NC} 는 함수 e/w 이며, 이것은 상기 마이크로 채널이 덕트 형태인 경우 덕트의 너비와 두께의 비율이다(원형 채널인 경우 상기 $\lambda_{NC}=1$ 이된다). 따라서 Hagen-Poiseuille 방정식에 따른 압력강하(길이 L , 너비 w 및 두께 e)는 하기 수학식 15로 정리된다.

수학식 15

$$\Delta P_f = 32 \lambda_{NC} \frac{\mu L u_m}{D_H^2}$$

<96>

<97> 여기에서 수력 직경 D_H 및 비-원형성 인자 λ_{NC} 는 하기 수학식 16으로 구할 수 있다.

수학식 16

$$D_H = \frac{2we}{w+e}$$

$$\lambda_{NC} = \frac{\frac{3}{2}}{\left(\left(1 - 0.351 \frac{e}{w} \right) \left(1 + \frac{e}{w} \right) \right)^2}, \quad 0 < \frac{e}{w} \leq 1$$

<98>

<99> 마이크로채널을 거치는 동안 평균 속도 u_m 은 편의를 위하여 하기와 같은 유속으로 전환될 수 있으며, 이때의 압력강하는 하기 수학식 17과 같다.

수학식 17

$$u_m = \frac{Q}{e w}$$

<100>

$$\Delta P_f = 32 \lambda_{NC} \frac{\mu L Q}{D_H^2 e w}$$

<101>

<102> 압력 강하에 따른 마이크로 채널 길이의 계산

<103> 도 7을 참조하면, 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가장 가까운 거리의 마이크로 채널의 유입부(710)와 유입 채널(720) 사이의 거리를 r'_{ref} 로 설정한 후 상술한 수학식으로부터 유도된 하기 수학식 18에 따라 상기 가장 가까운 거리의 마이크로 채널에 대하여 구하고자 하는 마이크로 채널이 갖는 유체 흐름 방향에서의 길이 단차 x 를 계산하였다.

수학식 18

$$32\lambda_{NC} \frac{\mu Q/n}{D_H^2 e w} x = \frac{3\mu Q}{4a^3 \alpha} \ln\left(\frac{r'}{r'_{ref}}\right)$$

$$x = \frac{3nw^3}{4\lambda_{NC} \alpha (e+w)^2} \ln\left(\frac{r'}{r'_{ref}}\right)$$

<106> 상기 식에서 w 는 마이크로 채널의 너비, e 는 마이크로 채널의 두께, λ_{NC} 는 비-원형 인자, n 은 마이크로 채널의 수, α 는 유체 흐름 방향에 대하여 발산 채널의 일 면이 이루는 각, r'_{ref} 는 발산채널의 타 측의 중심으로부터 가장 가까운 거리의 마이크로 채널의 유입부와 유입채널 간의 거리이며, r' 는 돌출 거리 x 를 구하고자 하는 특정 마이크로 채널의 유체 유입부와 유입채널 간의 거리이다.

<107> 이로써, 발산 채널의 타 측 중심으로부터 가장 먼 거리의 마이크로 채널이 시작되는 지점에서부터 모든 마이크로 채널의 압력과 유속은 동일해진다.

<108> 실시예

<109> 본 발명에 따른 마이크로 반응기에 흐르는 유체의 유속을 수치해석 프로그램(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용, 분석하였다.

<110> 도 8a 및 8b는 본 발명에 따른 마이크로 반응기에 대한 유속 분포를 CFD으로 분석한 그래프이다.

<111> 도 8a에서 발산 채널 내의 원호는 등압선을 나타내며, 상기 발산 채널의 내측의 마이크로채널 유입부의 압력이 외측의 마이크로채널 유입부의 압력보다 높은 것을 알 수 있다.

<112> 도 8b는 상기 마이크로 채널에서의 압력 분포를 나타내는 다이어그램이며, 도 8b를 참조하면, 모든 마이크로 채널에서 유속은 일정하다는 것을 알 수 있다.

<113> 즉, 내측 마이크로 채널의 유입부에서의 상대적으로 높은 압력은 상기 길이 차에 따라 압력 강하에 의하여 떨어지며, 이로써 모든 마이크로 채널간에는 동일압력을 갖게 되고, 그 결과 상기 마이크로 채널간의 유속 분포는 동일해진다.

<114> 비교예

<115> 도 9a 및 9b는 종래의 기술에 따른 마이크로 반응기에 대한 CFD 분석 결과이다.

<116> 도 9a를 참조하면, 본 발명에 따른 마이크로 반응기와 같이 발산 채널의 내측에 결합된 마이크로 채널 유입부의 압력이 외측에 결합된 마이크로 채널 유입부보다 높다는 것을 알 수 있다.

<117> 하지만, 도 9b를 참조하면 종래의 마이크로 채널은 길이가 일정하므로 이러한 압력 차이를 감쇄시킬 수 없으며, 이러한 압력의 차이는 마이크로 채널 전체에 걸쳐서 동일한 양상으로 나타난다.

도면의 간단한 설명

<118> 도 1은 종래의 기술에 따른 매니폴드형의 마이크로채널 반응기에 대한 단면도이다.

<119> 도 2는 종래의 마이크로 반응기에 대한 단면도이다.

<120> 도 3은 종래 기술에 따른 또 다른 형태의 마이크로 반응기에 대한 단면도이다.

- <121> 도 4는 Amador에 의하여 개시되는 반응기의 단면도이다.

<122> 도 5a 및 5b는 본 발명에 따른 상기 마이크로 반응기를 나타내는 단면도 및 사시도이다.

<123> 도 6a 내지 6c는 각각 본 발명에 따른 발산 채널의 단면도 및 측면도이다.

<124> 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따라 거리 x 만큼 삽입된 마이크로 채널을 구비하는 마이크로 반응기를 나타내는 단면도이다.

<125> 도 8a 및 8b는 본 발명에 따른 마이크로 반응기에 대한 유속 분포를 CFD으로 분석한 그래프이다.

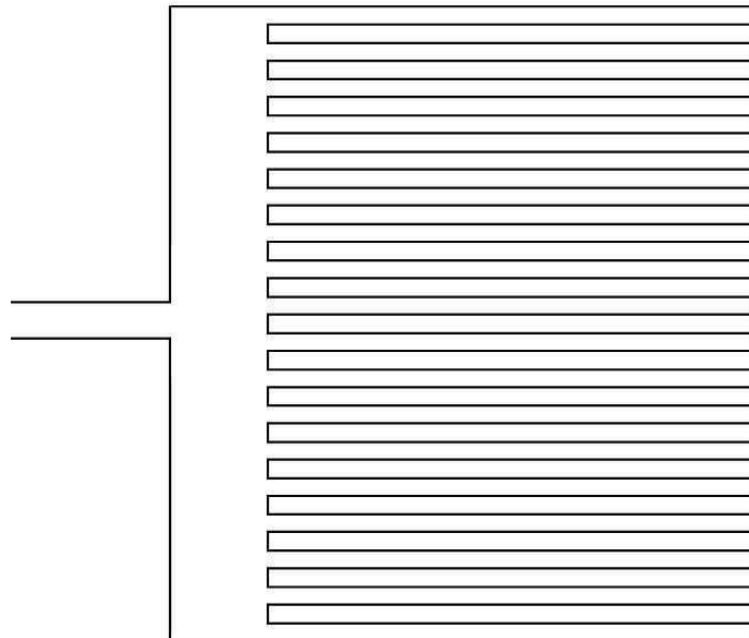
<126> 도 9a 및 9b는 종래의 기술에 따른 마이크로 반응기에 대한 CFD 분석 결과이다.

<127> <도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

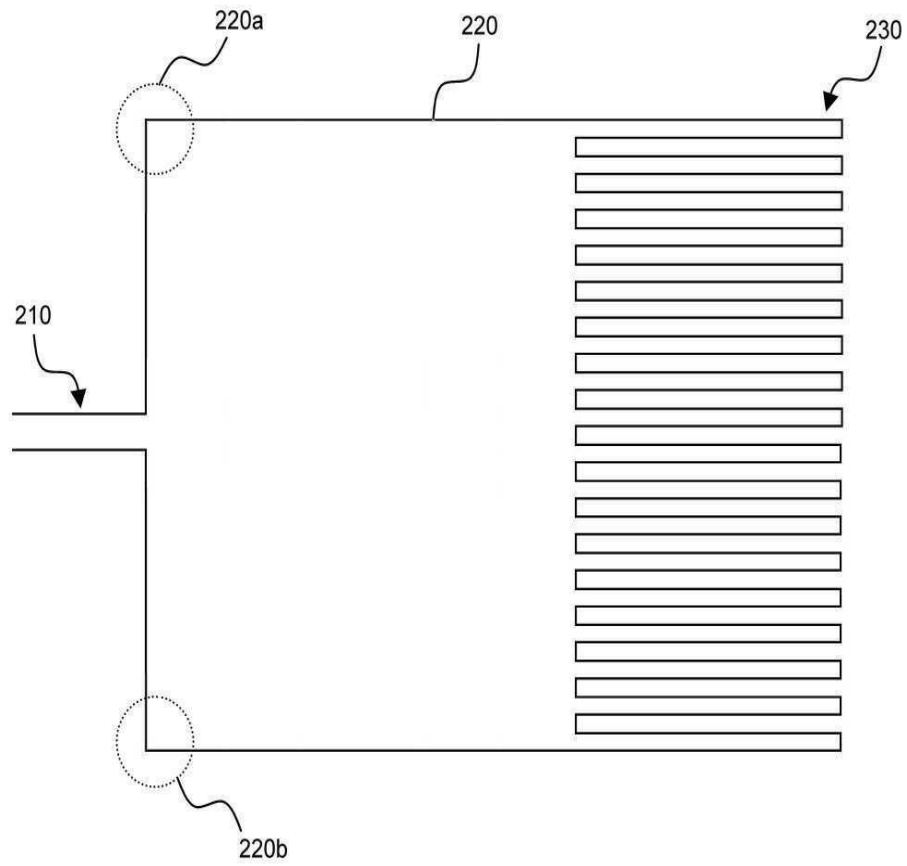
<128> 510.....유입채널	520.....발산채널
<129> 530.....마이크로 채널	

도면

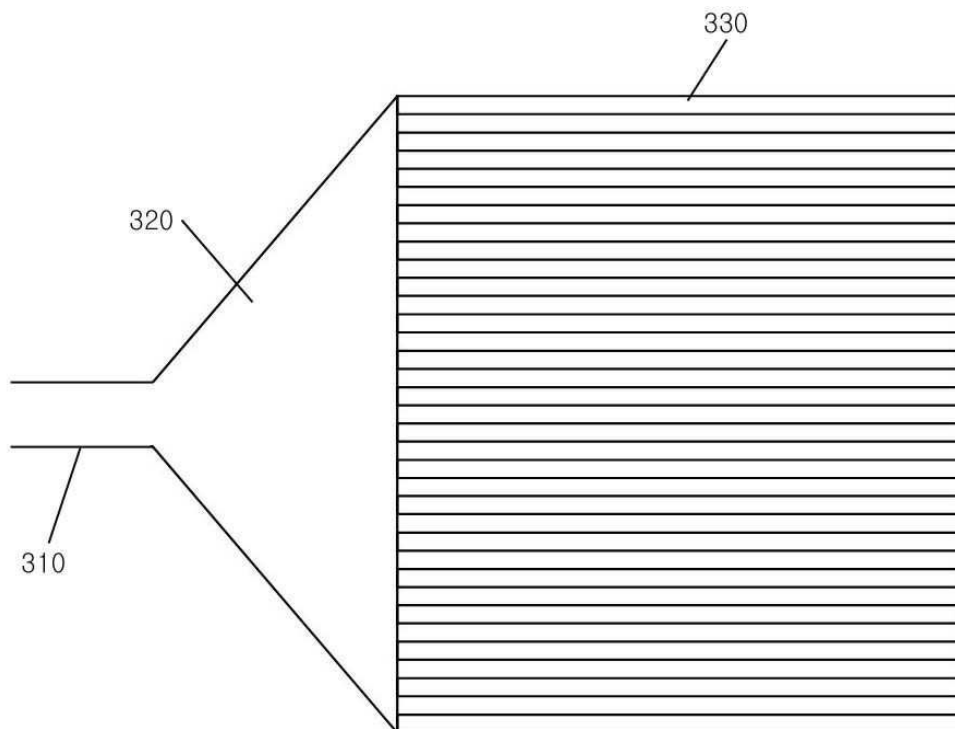
도면1



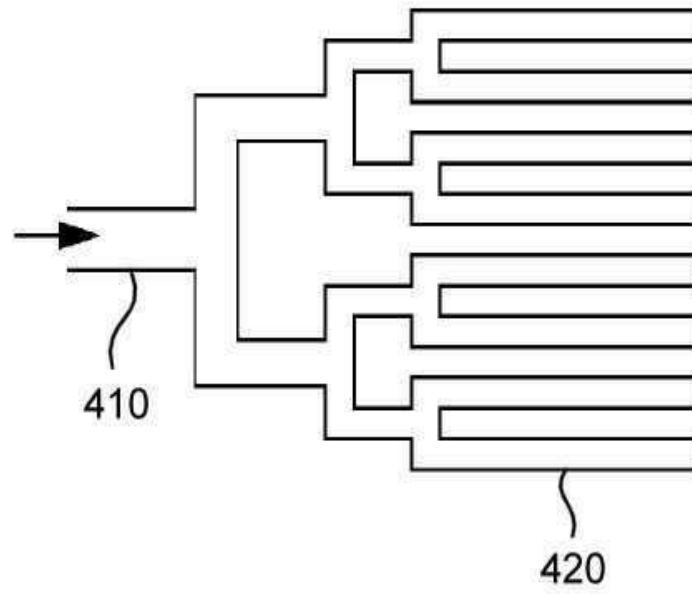
도면2



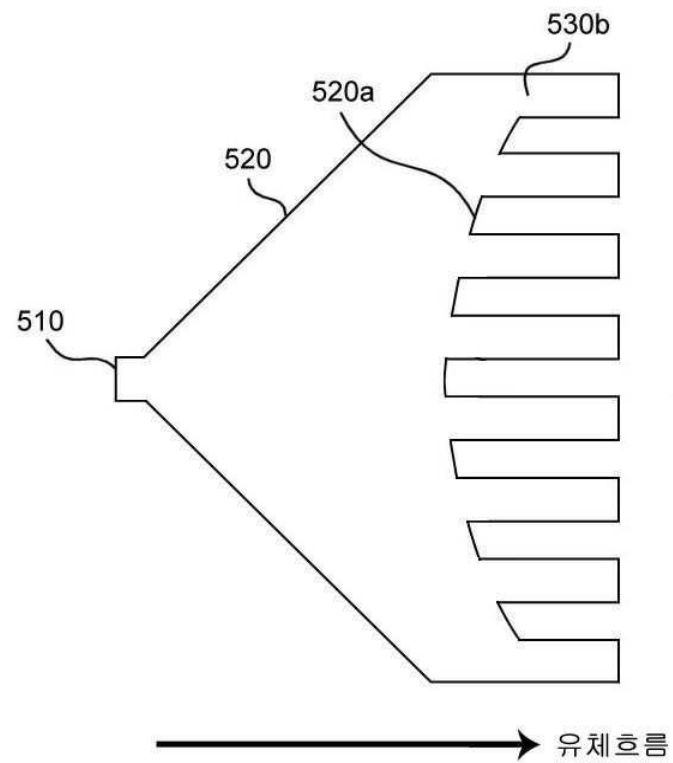
도면3



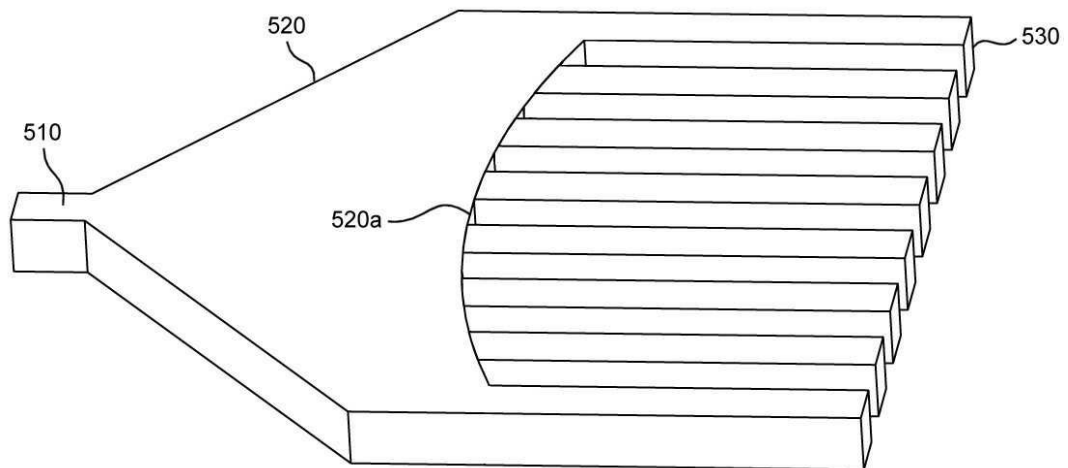
도면4



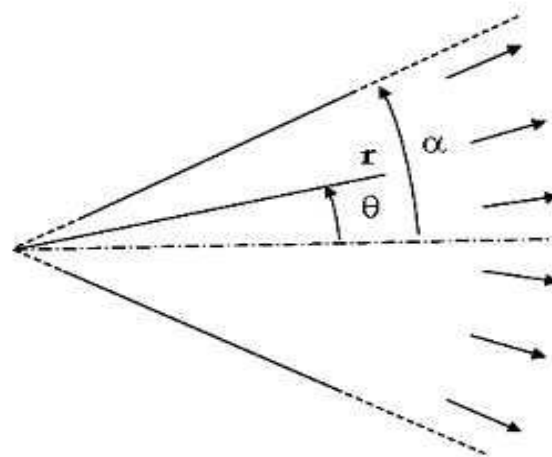
도면5a



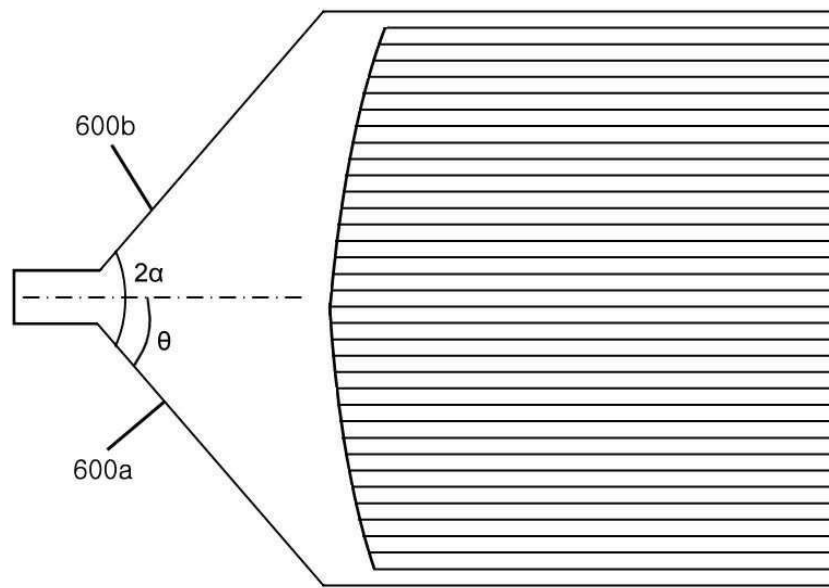
도면5b



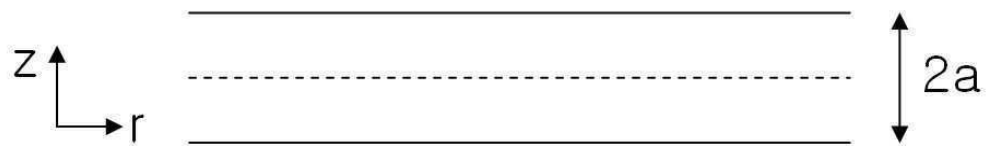
도면6a



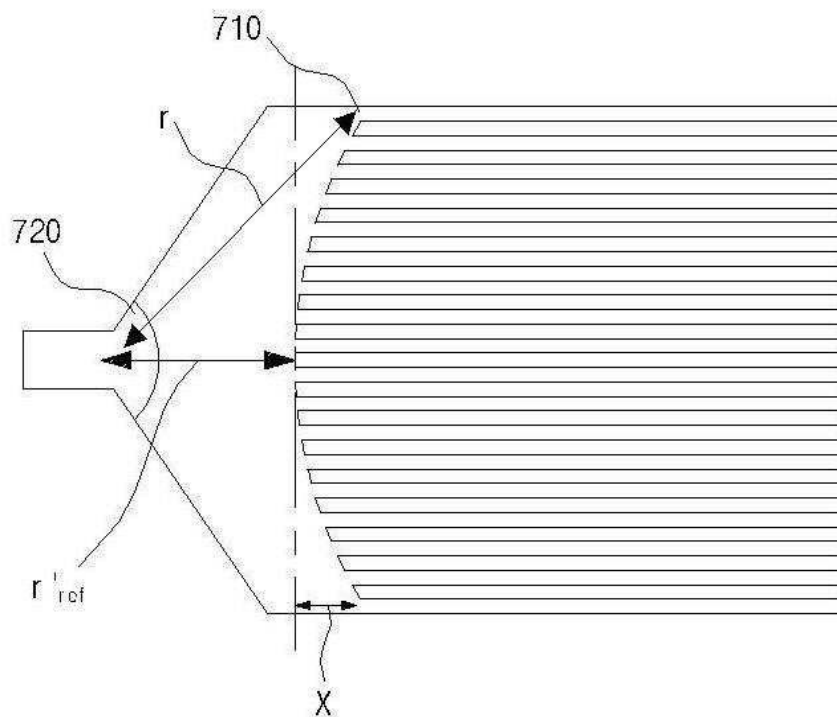
도면6b



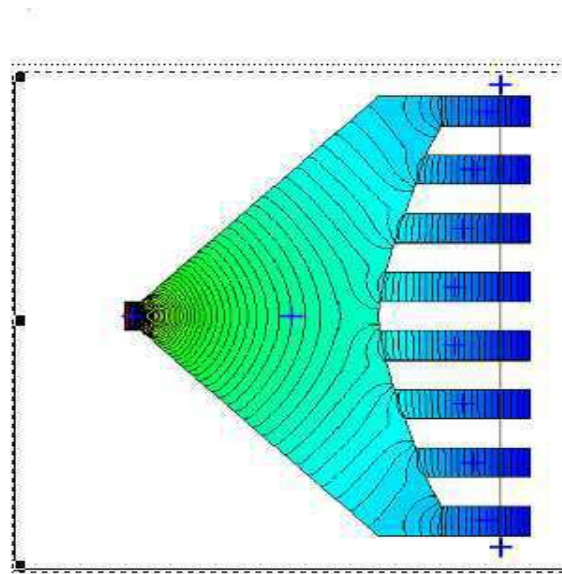
도면6c



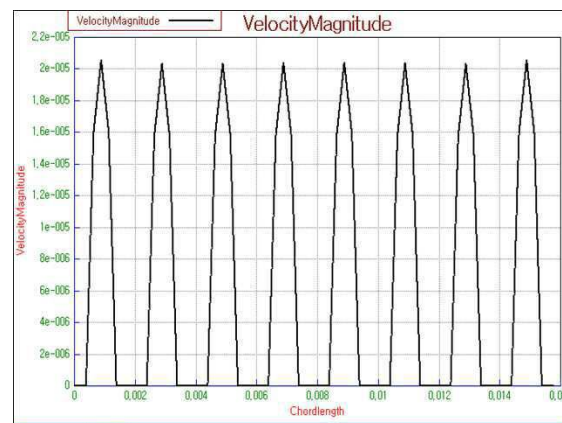
도면7



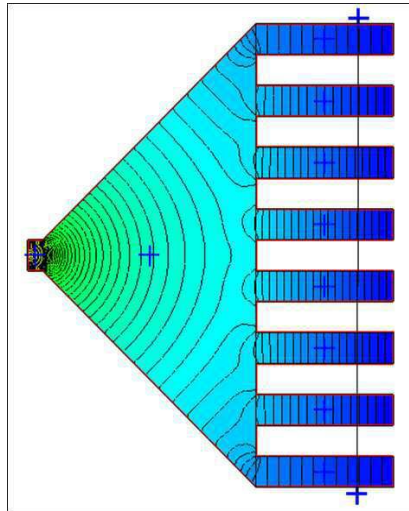
도면8a



도면8b



도면8c



도면8d

