(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2008-0075244
(43) 공개일자 2008년08월18일

(51) Int. Cl.
G06F 17/50 (2006.01) *G06F 9/455* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2007-0014124
(22) 출원일자 2007년02월12일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천 남구 용현동 253 인하대학교
(72) 발명자
원태영
경기 화성시 장안면 수촌리 957-3
이정복
서울 강서구 화곡동 887번지 11호 태승APT 401호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이원희

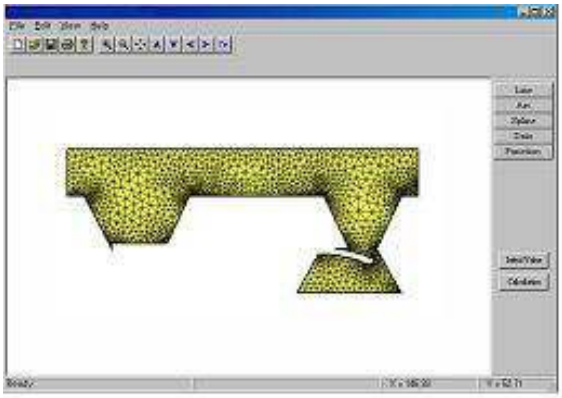
전체 청구항 수 : 총 3 항

(54) 마이크로 펌프 유동 전산 모사 해석기

(57) 요 약

본 발명은 마이크로 펌프의 유동을 해석할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 마이크로 펌프 내부의 형상에 맞추어 자동 격자와 경계 형상을 생성하고, 수치 해석적 방법을 이용하기 위한 비직교 정렬 격자계를 사용한다. 마이크로 펌프는 작동하는데있어 입·출구 압력차가 발생하고 채널 내부는 Knudsen 수의 조건에서 보면 Knudsen 수가 크지만, Mach 수가 작은 유동을 형성하면 희박도는 크지만 비평형도가 작은 MEMS 유동 조건에 적합한 유동 해석을 할 수 있게 된다. 그러므로 Navier-Stokes 방정식과 slip 경계조건을 적용하여 수치해석 기법인 유한 체적법을 이용하여 마이크로 펌프의 유동을 해석할 수 있는 해석기를 개발하였다.

대표도 - 도5b



(72) 발명자

김병환

서울 노원구 하계1동 청구아파트 106-403

신형순

서울 서초구 서초3동 1477-1번지 아이파크빌 102-301

특허청구의 범위

청구항 1

마이크로 펌프 유동을 해석하기 위한 수치해석적 방법에 있어서,

유한 체적법을 이용한 마이크로 펌프의 유동 해석기.

청구항 2

제1항에 있어서, 유동 해석을 위한 마이크로 펌프의 자동 격자 생성기.

청구항 3

제2항에 있어서, 자동 격자 생성을 위해 사용하는 비직교 다중 격자 시스템에 대한 수치해석 코드.

명 세 서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

<12> 본 발명은 미소 유량을 정확히 조절하고, 특히 펌프의 성능을 측정하기 위해 수치적 방법인 유한 체적법을 이용한 마이크로 펌프의 유동을 해석할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 최근 MEMS 기술의 발달과 더불어 마이크로 펌프, 마이크로 밸브와 같은 미세 유량 제어의 유체 소자에 대한 개발이 진행되고 있다.

<13> 기체 입자의 상호작용으로 발생하는 여러 물리 현상들은 미시적(microscopic or molecular) 또는 거시적(macroscopic or continuum) 관점에서 해석될 수 있으며, 이를 해석하기 위한 방법들이 여러 방향으로 진행되어 왔다. 이를 해석하기 위한 물리적인 개념 및 수학적 모델링 과정을 통해 여러 가지 방법들이 제시되어 왔다. 하지만 여러 가지 해석적 모델들은 물리적인 법칙에 어긋나는 가정을 통해 해석이 수행되어 왔으며 많은 한계점을 나타내고 있다.

<14> 크게 기체 입자들의 운동을 해석하기 위한 모델로써 입자(molecular)와 연속체(continuum) 개념으로 나눌 수 있으며, 입자 모델은 크게 결정적(deterministic) 모델과 확률적(statistical) 모델로 나눌 수 있다. 결정적 방법은 입자 동역학의 개념으로 해석할 수 있으며, 확률적 모델은 입자 상호 간의 충돌 모델로 Klimontovich 와 Liouville 방정식으로 나눌 수 있다. 하지만 이런 방법은 복잡한 형태의 모델로써 거의 사용되지 않고 있다. 또한 입자의 운동을 해석하기 위한 수치 해석 기법으로 수학방정식을 이용하는 직접 방법(direct method)과 다수 입자를 사용하여 기체의 운동을 묘사하는 모사방법(simulation method)으로 크게 나눌 수 있다. 직접 방법은 일반적인 유체역학에서 연속체 개념을 도입하여 계산되는 방법이며 모사방법은 기체 입자 간의 운동을 해석하게 되는 MD, MC, DSMC 등의 계산법을 사용한다. 유체 유동을 계산시 Knudsen 수가 큰 희박 기체의 유동 현상을 해상하기 위해서는 일반적인 유체 해석이 불가능하게 된다. 이런 문제를 해석하기 위해서 연속모델을 적용하게 되는데 이런 연속모델은 비효율적인 계산 형태를 가지게 된다. 하지만 Knudsen 수가 큰 유동의 경우 해상하기 위해서는 연속 모델을 적용해야 하는 문제가 있다.따라서 마이크로 펌프 유동을 해석할 수 있는 새로운 방법이 모색되어야 한다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

<15> 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것으로, 정확하게 미소 유량을 조절하고 복잡한 형상에서 펌프 유동에 관련된 속도장을 효율적으로 해석하기 위해서 유한체적법을 사용한 새로운 해석기를 만드는 것에 그 목적이 있다.

발명의 구성 및 작용

<16> 상기 목적을 달성하기 위해서 본 발명의 마이크로 펌프의 유동 해석기를 제공한다. 마이크로 펌프 내부 구조에서 밸브의 개폐를 위한 메커니즘을 제외하고는 마이크로 채널 내부 유동으로 간주할 수 있다. 마이크로 채널이나 튜브는 MEMS 장치의 기본요소로서 기초 연구로써 진행되어 왔으며 Ho 등 연구자들에 의해 실험적으로 결과를

보인 바 있다. 높이(y : H) 가 마이크론 단위이고 길이(x : L)가 밀리미터 단위인 입?출구 압력차가 발생하고 채널 내부는 Knudsen 수의 조건에서 보면 Knudsen 수가 크지만 Mach 수가 작은 유동을 형성하면 희박도는 크지만 비평형도가 작은 MEMS 유동 조건에 적합한 유동해석을 할 수 있게 된다. 그러므로 Navier-Stokes 방정식과 slip 경계조건을 적용하여 저속 등온 유동은 아래의 편미분 방정식에 의해 해석될 수 있다.

<17> 마이크로 채널의 2차원의 연속방정식은

수학식 1

$$\varepsilon\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}=0$$

<18>

<19> 여기서 는 채널 길이에 대한 높이의 비이다.

<20> x-방향으로의 모멘텀 방정식은 다음과 같다.

수학식 2

$$\frac{24}{\delta}\frac{dp}{dx}=\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

<21>

<22> 여기서 $\delta=24\frac{N_\delta}{\varepsilon}$, $N_\delta=K_n\cdot M\sqrt{\frac{2\gamma}{\pi}}$ 이고 비평형도의 composite 수이다.

<23> 실제 마이크로 펌프내의 유동은 마하수가 낮은 일반적인 유동 현상에서는 비압축성 유동 영역에 해당되나 MEMS 장치의 점성을 고려하기 때문에 압력 변화를 고려하여야 한다.

<24> Langmuir 경계 조건을 적용하면 국소 조건의 고정벽면에 대해 다음과 같다.

수학식 3

$$u_s=\frac{u(x,y=0)}{1+\beta p}$$

<25>

<26> 여기서 x=0인 지점은 마이크로 채널의 입구이고 1은 채널의 출구를 의미한다. y=0 는 채널 중간 지점을 의미한다. 식 (1), (2)에 입·출구 압력 조건, 벽면슬립 경계조건, 대칭조건, 벽면 수직속도가 영인 조건을 적용하면 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

수학식 4

$$u(x,y)=-\frac{3}{\delta}p'\left(1-4y^2+\frac{1}{\beta p}\right)$$

<27>

수학식 5

$$1-x=\frac{1-p^2+2(1-p)/\beta}{1-p^2_{x=0}+2(1-p_{x=0})/\beta}$$

<28>

<29> 여기서 $\delta=p^2_{x=0}-1+\frac{3}{\beta}(p_{x=0}-1)$ 이고 질량유량은 $\dot{m}=\frac{H^3 w p^2_{out}}{24\eta LRT}\delta$ 이 된다. w, η, R 은 채널의 폭, 점성계수, 기체상수를 나타낸다. 여러 가지 모델에서의 유동현상을 해석하려면 그 모델의 경계

형상을 정확히 표현해낼 수 있는 CAD 프로그램의 개발이 먼저 이루어져야 된다.

<30> 본 발명에서는 크게 두 가지 범주로 자유 곡선을 그리는 부분과 직선, 사각형, 원 그리는 부분으로 나누어 생각해 볼 수 있다. GUI에서 구현되는 직선, 사각형, 원 그리기는 다음과 같다. 마우스 버튼을 누르고, 마우스 커서를 움직이면 그림이 계속 마우스 커서를 따라다니다가 마우스 버튼을 떼는 순간에 그림이 고정 되게 된다. 그래서 직선, 사각형, 원 그리기의 경우는 마우스 커서가 움직일 때마다 이전에 그려졌던 그림을 지우고 배경을 복원하기 위해서, R2_XORPEN 레스터 오퍼레이션을 사용하여 그림을 그려야 한다. 반면에 자유곡선은 마우스 버튼을 누르고, 마우스 커서를 움직이면 바로 그림이 그려지기 때문에 R2_COPYPEN 레스터 오퍼레이션을 이용하여 그림을 그릴 수 있다. 결과적으로 본 발명에서 개발한 프로그램은 직선, 원호, 함수 곡선, 자유 곡선 등의 다양한 곡선들을 이용하여 모델의 경계 형상을 그릴 수 있다. 직선을 벡터 방정식으로 표현하면 아래식과 같다.

수학식 6

<31> $$\vec{l} = (1-t)\cdot\vec{l}_s + t\cdot\vec{l}_e \qquad (0 \le t \le 1)$$

<32> 원호를 벡터 방정식으로 표현 하면 아래식과 같다.

수학식 7

<33> $$\vec{l} = (1-R(\theta))\cdot\vec{l}_{cr} + R(\theta)\cdot\vec{l}_s \qquad (0 \le \theta \le 2\pi)$$

<34> 주어진 일련의 제한 점 군(Constraint Point)의 위치 값을 반드시 만족하여 생성되는 보간 곡선으로 구간별 3차 다항식을 사용한 3차 Spline 보간 곡선을 이용한다. 이러한 curve 는 단면 곡선(section curve) 또는 안내 곡선(Guiding Curve)으로 사용된다. 그리고 고차의 다항식을 이용하여야 어느 정도 정확한 근사를 할 수 있다. 공간상의 곡선을 정의하는 최소 차수의 다항식은 3차 곡선이므로, 여러 개의 곡선을 이어서 적절한 복합 곡선을 만들 수 있다. 이렇게 만들어진 곡선을 2차 미분 연속의 3차 스플라인 곡선이라 부른다. 이것은 곡선의 중간점에서 1차 및 2차 미분 연속조건을 사용하여 만들 수 있다. 3차 다항식 근사식은 식(8)에 나타내었다.

수학식 8

<35> $$S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1})$$

$$S''_{j+1}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1})$$

<36> 함수 곡선은 식(9)와 같이 t에 대한 매개 변수로 표현할 수 있으며, 매개 변수 t의 구간을 설정하여 표현할 수 있다.

수학식 9

<37> $$x = f(t),\ y = g(t)$$

<38> de Boor, Cox 등이 제안한 B-spline 곡선을 본 발명에서 사용하게 된다. 여기서는 블렌딩 함수는 조정점의 개수와 관련된 n을 포함하지 않고, 원하는 차수를 직접 지정할 수 있으며 모든 블렌딩 함수는 매개변수 t의 범위 중 각각 서로 다른 일정범위에서의 값만을 갖는다.

<39> B-spline 곡선의 블렌딩 함수 자신도 spline이다. 차수 k의 (즉 k-1 차수의) B-스플라인 다항식은 다음과 같이 정의된다.

수학식 10

$$N_{i,k}(t)=\frac{(t-x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1}-x_i}+\frac{(x_{i+k}-t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}}$$

<40>

<41> 여기서 x_i 는 매듭값(knot value)이며, 매개변수 t를 조정점 pi와 관련시키는 역할을 한다. 즉 t를 여러 개의 구간으로 나누어 각각의 블렌딩 함수가 0 이 되지 않는 범위의 경계가 되는 t 값이다. 보통은 정수형의 매듭값이 편의성 때문에 많이 사용되며, 차수 k의 블렌딩 함수는 매듭벡터(knot vector)의 k-구간에서 0이 아닌 값을 갖는다. 또한 $N_{i,k}(t)$ 는 비균일 B-spline의 기본 함수(base function)이다. 위의 경계 곡선들로 이루어진 경계형상의 예를 본 발명에서 적용한 마이크로 펌프에 적용하면 도2와 같다.

<42> 본 발명에서는 자동 격자생성에 기본을 두고 마이크로 펌프의 기본적인 형태에 입구 밸브와 출구 밸브의 개폐시 단일 형태에서의 격자생성을 수행하였다. 다음 도2(a)와 도2(b)는 user가 계산하고자하는 형상을 생성하는 과정을 보이고 있다. 비정렬 격자계를 사용하는 대와류 모사방법을 적용하기 위하여 본 발명에서는 압축성 유동의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 적분방정식 형태로 적용하였다.

<43> 연속방정식은 다음과 같으며,

수학식 11

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0$$

<44>

<45> Navier-Stokes 방정식은

수학식 12

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i$$

<46>

$$\sigma_{ij}=-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ji}+\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

<47> 여기서 인 점성 응력이다.

<48> 식 (12)의 모멘텀 보존 방정식에서 중력과 외력의 영향은 받지 않는다고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 13

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}$$

<49>

<50> 에너지 방정식은

수학식 14

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho h u_i)}{x_i}=\frac{\partial p}{\partial t}+u_i\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+\Phi$$

<51>

<52> 이다.

<53> 여기서 Φ 는

수학식 15

$$\Phi = -\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)^2 + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

<54>

<55> 점성 소산이다.

<56> 에너지 방정식에서 압력은 $p = (p_o + p)/RT$ 이고 엔탈피는 $h = C_p T$ 으로 정의된다.

<57> 이차원 유한체적법의 경우 도3의 왼쪽은 삼각형 구조이며 $(\overrightarrow{r_{12}} \times \overrightarrow{r_{13}}) \cdot \vec{k} > 0$ 으로 $\overrightarrow{r_{12}}$은 절점 1에서 절점 2로의 위치 벡터이다. 도3의 오른쪽은 사면체 구조이며 $(\overrightarrow{r_{12}} \times \overrightarrow{r_{13}}) \cdot \overrightarrow{r_{14}} > 0$ 으로 정의된다. 유한체적법에서 사용하는 비직교 정렬 격자는 도4에 나타나 있으며 도4의 비직교 정렬 격자계의 다중 격자(multi-grid) 구조를 통해 복잡한 형상의 수치계산이 수행될 수 있다. 일반적으로 물리량의 속(flux)을 구하기 위해서는 제어면에서의 물리량의 구배, 즉 $\partial\phi/\partial x|_e$ 를 구하는 것이 필요하다. 이러한 flux는 Green함수 이론을 사용하면 다음 식으로 표현된다.

수학식 16

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \frac{1}{V}\int_S \phi \overrightarrow{S} \cdot \overrightarrow{i_x}$$

<58>

<59> 그러나 $\partial\phi/\partial x|_e$ 를 $\partial\phi/\partial x|_P$ 와 $\partial\phi/\partial x|_E$ 의 선형조합으로 표시하면 격자점 P와 E의 영향은 줄어드는 반면, 격자점 ee와 w의 영향이 식에 들어가게 되므로 수치적 혹은 계산편의성에 비춰 볼 때 바람직하지 않게 된다. $\partial\phi/\partial x|_e$ 를 구하는 개선된 방법들 중 가장 간단한 방법은 E점과 P점을 연결하는 폐쇄형 표면을 y 와 z 의 방향으로 정의하는 것이다. 따라서 표면의 양쪽 면에서 $\partial\phi/\partial x|_e$ 를 정의하여 내삽(interpolation)하는 방법을 적용하게 되면 다음과 같다.

수학식 17

$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial x}\right|_e^+ = \frac{1}{V_e^+}\left\{A_E\phi_E - A_e\phi_e + \beta^+\left[A_{ne}\phi_{ne} - A_{se}\phi_{se} + A_{ue}\phi_{ue} - A_{de}\phi_{de}\right]\right\}$$

<60>

<61> 여기서 β^+ 는 전체표면 중 e와 E 사이에 있는 부분의 값이다. 본 유한체적법에서는 모든 표면에 대하여 β^+ 가 일정하다고 단순화하였다. 어떠한 방법이든지 $\partial\phi/\partial x|_e$ 가 선형내삽에 의해 구해지게 되므로 β^+ 를 일정하다고 가정하는 것은 타당하다. 이러한 가정과 함께 다음의 관계가 성립된다.

수학식 18

$$V_e^+ = \beta^+ V_E, \quad A_E = A_e + \beta^+(A_{ee} - A_e)$$

<62>

<63> 이를 이용하여 정리하면 결국 다음과 같은 관계를 얻는다.

수학식 19

$$\gamma = \frac{V_e^+}{V_e}, 1-\gamma = \frac{V_e^-}{V_e}, V_e = V_e^+ + V_e^-$$

<64>

<65> 위 식들을 정리하면 S_ϕ 는 다음 식으로 표시된다.

수학식 20

$$S_\phi = \frac{V_e^+}{V_P} A_w \phi_w - \frac{V_e^-}{V_E} A_{ee} \phi_{ee} + \left(\frac{V_e^+}{V_e} - \frac{V_e^-}{V_e^+} + \frac{V_e^-}{V_E} - \frac{V_e^+}{V_P} \right) A_e \phi_e + \left(A_e \frac{V_e^-}{V_e^+} - A_e + A_{ee} \frac{V_e^-}{V_E} - A_e \frac{V_e^-}{V_E} \right) \phi_E + \left(A_e - A_e \frac{V_e^+}{V_e^-} + A_e \frac{V_e^+}{V_P} - A_w \frac{V_e^+}{V_P} \right) \phi_E$$

<66>

<67> 본 수치해석 코드에서는 연속방정식을 밀도에 대한 계산방정식으로 변환하는 DEFCON(Density Equation Formulation of Continuity Equation)이라는 방법을 이용하였다. 또한 Navier-Stokes 방정식은 일치(collocated)된 비직교 다중 격자 시스템에 대한 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 적분하였다. 본 방법의 가장 큰 장점은 국부적으로 그리고 전체적으로 질량과 물리량의 속(flux)을 내재적으로 만족시킨다는 것이다. 수치적 적분은 상태변수들에 대한 적분 형태(profile)를 가정하여 시작하게 된다.

<68> 본 발명에서는 안정성과 이차 정확도를 갖는 CONDIF 스킴을 사용하였다 (Runchal, 1987). 시간에 대한 적분방법으로는 세 방향(x, y, z)으로 나누어 대수방정식을 계산하는 ADI(Alternating Direction Implicit)방법을 적용하였으며, 이 방법은 선형적 의미에서는 무조건적 안정성을 나타낸다. 그러나 인수분해시 발생하는 삼차의 항을 무시하게 되므로 시간간격이 커지면 시간적분이 부정확해지는 단점이 있다. 도5에서 보듯이 삼각 격자생성은 경계 형상을 구현하는 데 좋은 장점을 가지고 있으며 user가 자세하게 해상하고자 하는 부분의 유동 현상을 조밀한 격자의 생성을 통해 자세하게 구현할 수 있다. 다음 도6은 마이크로 펌프의 밸브가 개폐시 발생되는 유동현상을 자동 생성된 격자계에서 수행한 결과이다. 도 6(a)의 입구 밸브가 열릴 때 밸브와 벽면의 좁은 유로를 통해 유량이 유입되고 밸브 상부의 층류 박리가 형성된다. 이 유입된 유량이 펌프 내에서 갇히게 되며 도 6(b)의 출구 밸브가 열릴 때 펌프 체적 내에 갇혀 있던 유량이 출구 밸브를 통해 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이 작동 원리는 마이크로 펌프 상판의 pumping 효과에 의해 위로 membrane이 움직일 때 입구 밸브가 열리게 되고 유량이 펌프내 체적내로 유입되며 membrane이 아래로 움직일 때 입구 밸브는 닫히게 되고 출구 밸브가 열려 유량이 밖으로 배출되는 원리를 가지게 된다.

발명의 효과

<69> 이상에서 상술한 바와 같이, 본 발명의 마이크로 펌프 유동 해석기는 종래 기술과는 달리 마이크로 펌 성능을 미리 예측할 수 있어 설계 비용측면에서 커다란 장점을 지닌다. 또한 마이크로 펌프의 구조를 변형하여 그에 따른 효과를 시뮬레이션할 수 있어 새로운 구조의 펌프 제작에도 널리 쓰일 수 있는 효과를 제공한다.

도면의 간단한 설명

<1> 도1은 종래의 기술에 따라 마이크로 펌프의 작동 원리를 나타내는 도면.

<2> 도2(a)는 본 발명에 따라 입구 밸브가 열릴 때의 경계형상을 생성하는 도면.

<3> 도2(b)는 본 발명에 따라 출구 밸브가 열릴 때의 경계형상 생성하는 도면.

<4> 도3은 본 발명에 따라 절점과 2차원의 삼각형 구조와 3차원의 사면체 구조의 격자계를 나타내는 도면.

<5> 도4는 본 발명에 따라 경계형상에 맞추어 자동 생성된 격자 형상을 나타내는 도면.

<6> 도5(a)는 본 발명에 따라 입구 밸브가 열릴 때 비직교 정렬 격자계를 나타내는 도면.

<7> 도5(b)는 본 발명에 따라 출구 밸브가 열릴 때 비직교 정렬 격자계를 나타내는 도면.

<8> 도5(c)는 본 발명에 따라 입구 밸브가 열릴 때 비직교 정렬 다중 격자 시스템을 나타내는 도면.

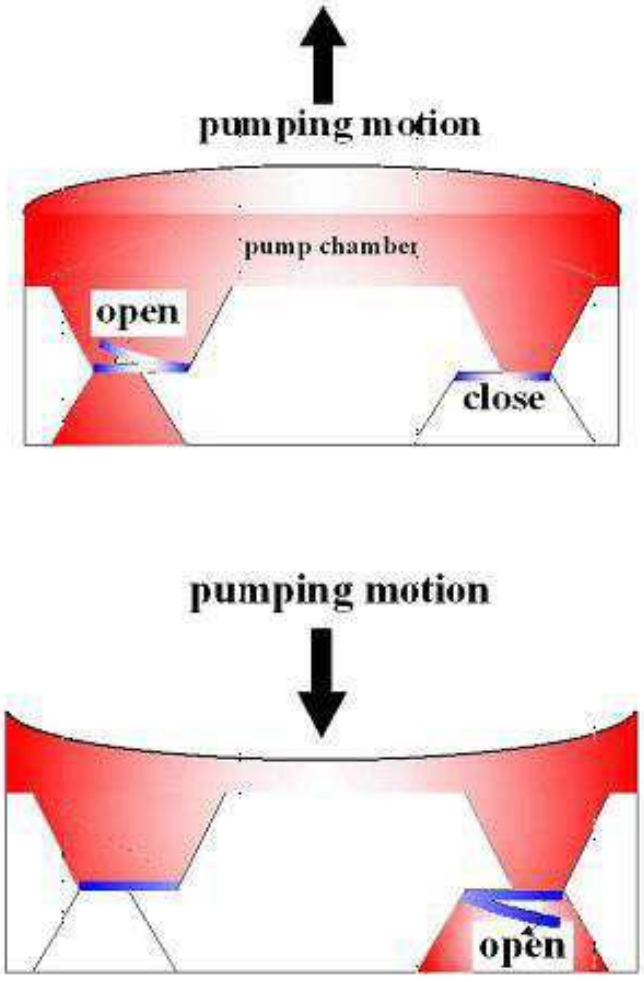
<9> 도5(c)는 본 발명에 따라 출구 밸브가 열릴 때 비직교 정렬 다중 격자 시스템을 나타내는 도면.

<10> 도6(a)는 본 발명에 따라 자동 격자 생성된 마이크로 펌프의 입구 밸브가 열릴 때의 속도장을 보여주는 도면.

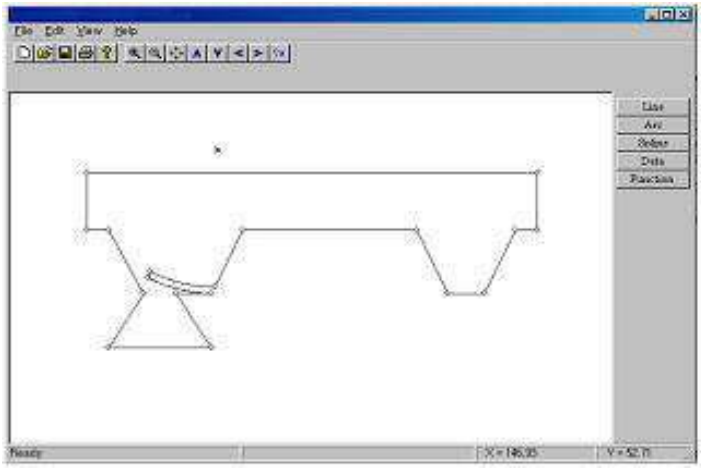
<11> 도6(a)는 본 발명에 따라 자동 격자 생성된 마이크로 펌프의 출구 밸브가 열릴 때의 속도장을 보여주는 도면.

도면

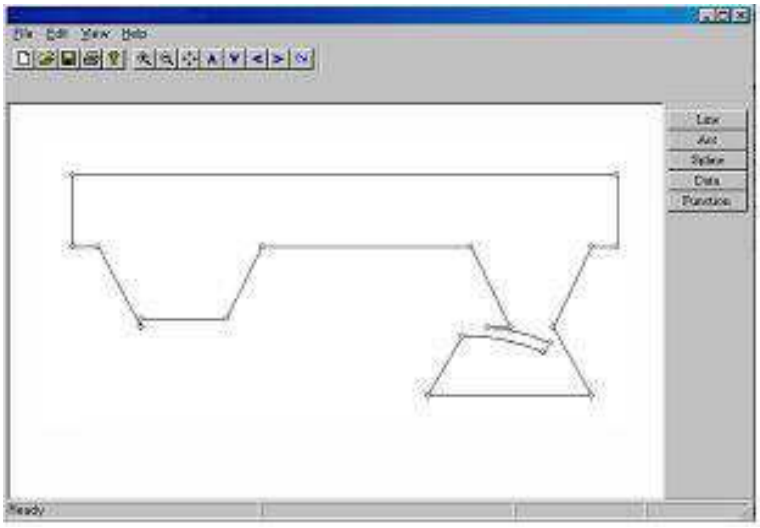
도면1



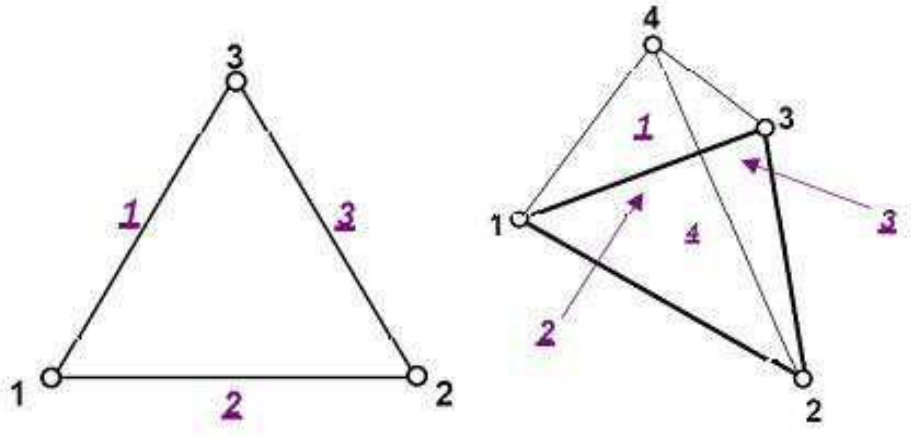
도면2a



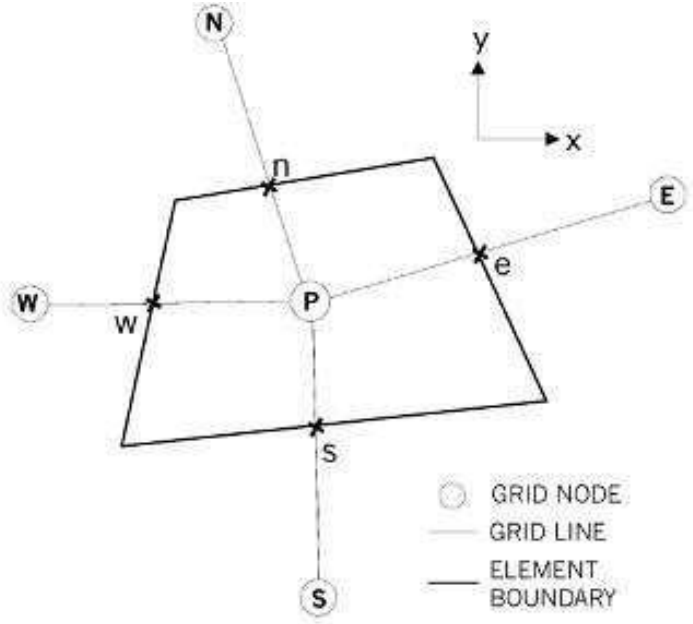
도면2b



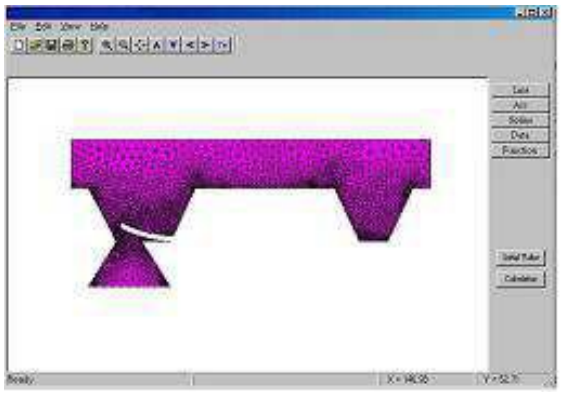
도면3



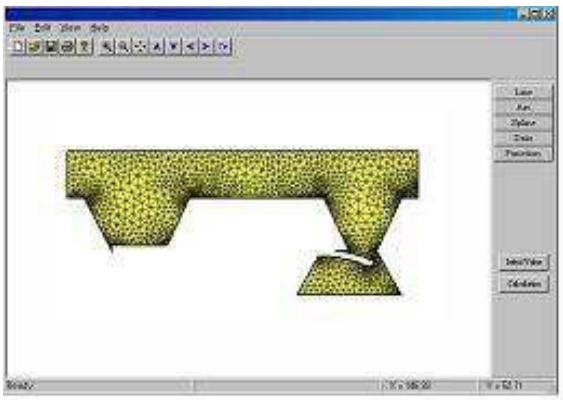
도면4



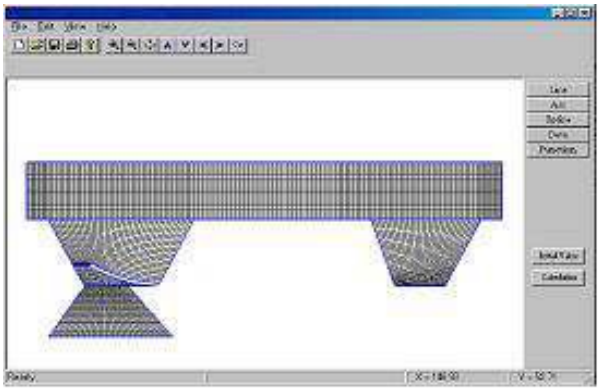
도면5a



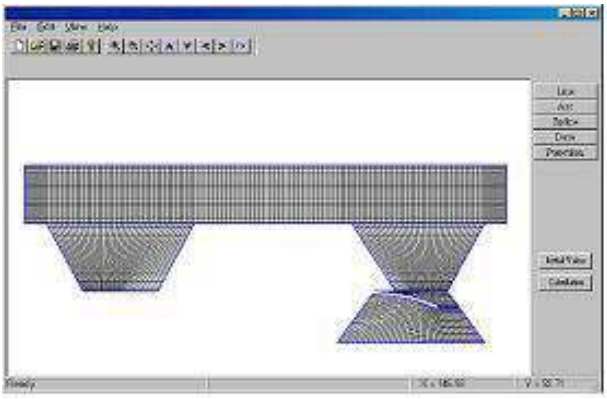
도면5b



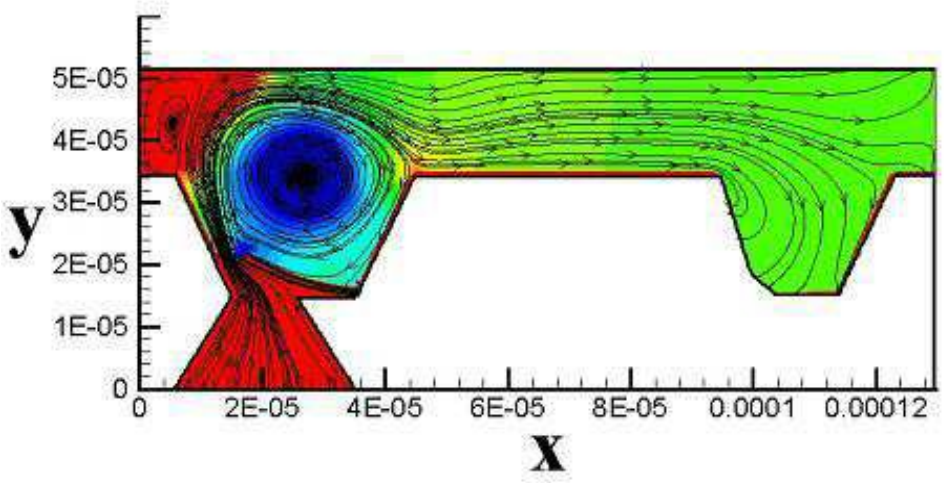
도면5c



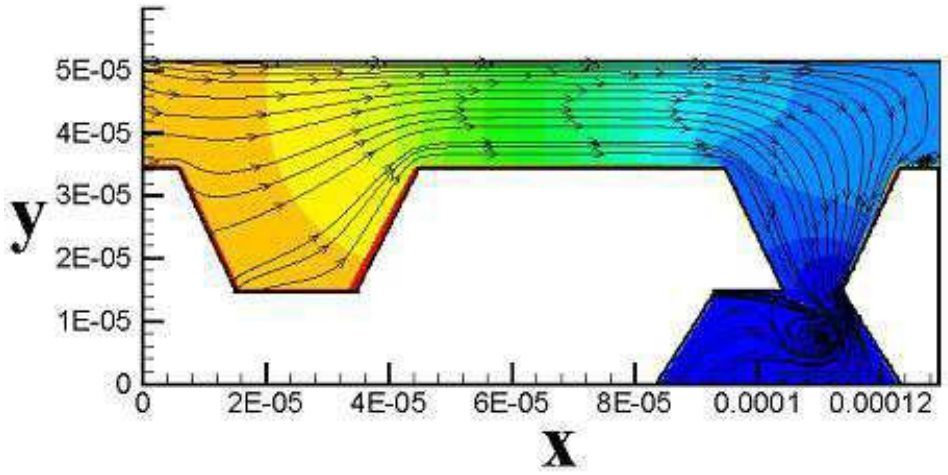
도면5d



도면6a



도면6b


5E-05
4E-05
3E-05
2E-05
1E-05
0
y
0
2E-05
4E-05
6E-05
8E-05
0.0001
0.00012
x