

포석정 흐름의 역사적, 과학적 고찰

Historic and Scientific Investigation of the Posuk-Pavilion Channel Flow

장근식¹⁾, 심은보²⁾

Keun-Shik Chang and Eun-Bo Shim

극동아시아 지역국가에서 曲水之宴은 역사적으로 크게 번성했다. 이들 고대국가의 지배층은 流觴曲水 돌레에 앉아서 詩를 지었으며 술을 채운 술잔이 앉은 자리에 도달할 때까지 詩를 짓지 못하면 罰酒를 내리는 유희(遊戱)를 즐겼다. 본 논문에서는 한국, 중국, 일본에 존재하는 曲水の 역사를 간결히 고찰한다. 또한 曲水之宴을 통하여 고대인물들이 즐겼을 流觴曲水를 지금은 완전히 기능이 정지된 포석정에 대하여 현대적인 전산기법의 도움을 받아 약간의 근사를 써서 시뮬레이션하였다. 또한, 술잔의 흥미로운 유로(流路)를 예측하여 보았다. 본 연구를 통하여 우리의 선조들이 즐겼던 우아했던 삶의 방식하나를 자세히 들여다 보는 것이 가능해 졌다.

1. 流觴曲水の 역사

4세기 중국에서 시작된 曲水之宴은 중국, 한국, 일본의 극동아시아 국가에서 크게 번성하였으며, 19세기말 중국의 마지막 봉건왕조가 무너질 때까지 지속되었다. 曲水之宴은 황제, 왕, 영주, 귀족, 詩人과 귀족들을 포함하는 지배층에게 고상한 遊戱가 되었다. 그들은 曲水주위에 둘러앉아 술잔이 앉은 자리까지 떠내려오는 제한된 시간에 짧은 시를 지어야 했으며, 실패하는 경우에는 罰酒를 주었다. 흥을 돋구기 위하여 曲水는 매우 구불거리게 만들어졌고 이로 인해 술잔은 더디게 흐르거나 유별난 유로를 따라 흐르는 것도 가능했다.

流觴曲水の 기원은 서기 353년 3월3일에 고대중국의 東晉시대에 浙江省 紹興에서 명필 왕희지를 포함한 42인의 학자가 물을 끌어 蘭亭이라 불리는 曲水를 만들고 會同한 것에서 출발한다. 이 曲水之宴에서 詩를 2首 지은이가 11명, 1首 지은이가 15명, 나머지 16명은 시를 짓지 못하여 罰酒三杯를 받았다. 여기서 만들어진 詩集의 序文이 그 유명한 왕희지의 蘭亭序이다. 그 후로 여러 개의 曲水가 건축되었고, 여기에는 그들을 위한 지붕이 있어 亭이란 이름을 붙이게 되었다. 중국에서 曲水는 泛觴亭, 覆觴亭, 流杯亭, 沁秋亭, 狹野亭 등의 이름으로 불리운다. 청국시대에는 이미 건축된 亭子에 황제가 下賜한 매우 詩의인 이름의 현판들을 달았는데 강희제가 쓴 曲澗浮花, 건륭제가 쓴 流水音 등이 그 예이다[1].

중국에서는 왕희지의 流觴曲水 외에도 다른 曲水の 유적이 많다. 1918년에는 登封縣에 있는 송나라의 崇福宮 터에서 돌을 파서 만든 曲水유적이 발견되었다. 저자가 알고 있는 중국의 여타의 다른 유적들은 명나라때 건축된 것으로 모두 북경에 있고, 이때보다 후대인 청나라의 황제들에 의

- 1) 한국과학기술원 항공우주공학과, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, 305-701. Tel) 042-869-3711
- 2) 경상북도 구미시 금오공과대학 기계공학과, 730-701

해 더욱 사랑받은 것 같다. 이들은 南海에 있는 流杯學蘭亭, 紫禁城의 柳賞亭, 竹刹海의 沁秋亭, 潭柘寺의 流杯亭, 圓明園의 坐石猨流이다. 이외에도 북경의 香山호텔에는 현대판 曲水가 지어졌다. 이들 曲水는 화강석이나 대리석으로 건축되었으며 송나라때 씌어진 營造法式[2]에는 曲水를 짓기 위해 필요한 石材의 양과 건축법을 적고 있다. Fig.1은 영조법식에 나타난 曲水의 모양은 물론 石材표면에 장식무늬를 넣은 文樣에 이르기까지 수로의 제작법을 교본적으로 보여주고 있다. Fig.2에 보인 자금성의 柳賞亭의 모습은 완전한 대칭형으로서 영조법식의 교본에서 그리 벗어나지 않고 있다. 단지, 曲水의 중앙에 內部水路를 한개 더 파주고, 수로의 입구와 출구를 좌측과 우측 맞은편으로 갈라놓았다는 정도의 차이가 있을 뿐이다.

일본의 曲水는 이와는 대조적으로 정원 조경의 일부로서 건축되었으므로 중국의 그것보다 규모가 크고, 따라서 曲水 위에 정자가 없다. 이것은 기본적으로 일본의 정원이 자연의 축소판인 것처럼, 중국이나 한국의 曲水와는 달리 화강석이나 대리석을 굴착함이 없이 인위적으로 地面에 개울을 파 준 것이다. 개울가에는 조경을 목적으로 자연석을 드문드문 가져다 놓았으며, 어떤 것은 水路를 포장하기 위해 납작한 片石들을 지면에 촘촘히 깔아 놓은 것도 있다.

중국 曲水之宴의 문화는 역사상 매우 일찍이 일본에 전파된 것으로 보인다. 일본의 문헌에는 서기 485년, 726년, 1007년, 1091년에 曲水之宴이 열렸다는 기록이 나온다. 일본의 曲水는 교토의 城南宮, 御所 그리고 上賀茂神社에 각각 한 개씩 있으며, 平泉의 毛越寺, 奈良의 왕궁유적, 岡山の 娛樂園에 있는 流亭, 그리고 규슈 鹿兒島の 磯庭園에도 각각 1構 씩 있다. 이들 曲水는 奈良시절부터 18세기에 이르는 다양한 시대에 건축되었다. 이들 역사적 遺蹟은 일본인들이 매우 소중히 여기는 것이며, 일부 曲水에서는 지금도 많은 관중 앞에서 해마다 古代의 曲水之宴을 재연해 보이고 있다(Fig.3).

曲水之宴의 문화는 古代의 문화전파 경로로 보아 아마도 일본보다 한국에 더 빨리 전파되었을 가능성이 있다. 정확히 언제 전파가 이루어졌는지는 불분명하나 일본의 경우와 상대적으로 생각하면 아마도 5세기 초나 중반무렵이 되는 것은 아닐까 싶다. 삼국유사와 삼국사기 모두에는 서기 879년 신라 憲康王이 포석정에 행차하였다는 기록이 나온다. 포석정(Fig.4)은 불행하게도 서기 927년에 55대 신라 景哀王이 이곳에서 曲水之宴을 즐기던 중에 후백제의 견훤에 의해 살해된 탓으로 한국역사에서 건축된 유일하고도 마지막인 水路가 되고 말았다. 중국과 일본에서 최근세까지, 포석정의 시절보다 천년이나 더 오랫동안 번성하고 사랑 받았던 曲水之宴의 문화가 한국에서는 일찍이 비난받고 단절되어 버린 것은 안타까운 역사의 아이러니라고 말하지 않을 수 없다.

포석정은 63개의 다듬어진 화강석으로 구성된 水路로서, 바닥석재의 양옆으로 측벽석재를 쌓아 수로를 만들었다. 이것은 긴축이 10.3m 이고 짧은축이 4.9m 이다. 포석정은 主水路 부분이 대충 계란형으로 둥글지만, 두 곳에서 예외적으로 매우 구비치는 인위적인 굴곡이 加味되었다. 水路의 깊이나 폭은 장소에 따라 다소 다르지만 규모를 알기 위해 水路는 대충 평균 폭이 0.3m , 깊이가 0.22m , 수로의 입구와 출구에서의 낙차가 0.4m 정도라고 말할 수 있다. 水路의 亭子は 어떤 모양이었는데, 또는 언제 소실되었는지 알지 못하며, 급배수장치가 현재 존재하지 않아 수로의 기능이 상실되어 있다.

현대 전산기법을 이용하여 曲水의 흐름을 고찰하면 극동아시아 국가에서 고대인들을 유희 중에 그토록 사로잡았던 매혹의 일부를 되찾아 낼 수 있을 것이다. 극동 3국의 曲水의 水路가 예외 없이 구비 치게 만들어진 것은 술잔의 표류를 가급적 지연시키는 외에도 어떤 다른 이유가 있을지 모른다. 중국의 대칭적인 水路와는 달리 한국의 포석정은 대칭을 깨뜨리기 위해 일부러 두 군데에

심한 불규칙적인 굴곡을 도입하였다. 해마다 曲水之宴이 재연되는 일본의 流觴曲水와는 대조적으로 한국의 포석정은 기능이 완전히 정지되어 관찰할 수도 없다. 본 논문에서는 컴퓨터 계산을 통하여 포석정의 흐름을 조사하고, 술잔의 流路까지도 컴퓨터로 可視化하였다. 이로 인해 약간의 詩心을 갖춘 사람이면 누구나 古代의 曲水之宴의 생생한 역사적 현장으로 달려갈 수 있을 만큼 충분한 결과를 얻었다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

曲水の 흐름은 蛇行(meandering)과 꼬임(braiding)이 있다는 점에서 河川의 흐름과 닮았다. 한가지 특별한 것은 曲水는 하천보다 규모가 매우 작으므로 표면 중력파는 중요치 않으나 표면장력은 약간의 역할을 할 수도 있다. 曲水 흐름의 일부가 일본 교토의 城南宮의 曲水에서 Nakayama 교수 등에 의해 실험적으로 관찰되었다[3]. 그들은 흐름의 정체, 剝離, 역류, 와류 등을 보았고, 이로 인해 술잔의 유로가 흥미롭게 되는 것을 관찰하였다. 그들은 또한 2차원적으로 수치 해석을 수행하여 그 결과를 실험과 일부 비교하였다.

1980년에 1/5.4의 비율로 축소된 포석정의 모델에서 본 논문의 첫 번째 저자가 실험을 수행한 적이 있다[4]. 실험에서는 흐름이 여러 가지 변수에 의해 영향을 받고 또 극히 복잡하다는 것을 드러냈다. 알루미늄 가루의 궤적선들에 의해 可視化된 수로의 표면흐름은 Fig. 5에 보인 것처럼 통상의 개수로(開水路)유동에서 보는 것 이상으로 대규모의 박리와 와류가 있음을 보여준다. 그러나 실험에서 유속, 와도, 압력, 난류유동, 표면장력, 표면파 등의 중요한 물리량은 측정이 사실상 불가능하다. 심지어는 관찰로부터, 초기조건 등 많은 변수에 의존하는 술잔 流路의 기하학적 지도를 만드는 것조차도 그리 쉬운 일이 아니었다.

전산해석분야에서도 물리적 흐름의 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 여전히 기술적인 어려움이 도사리고 있다. 떠내려가는 술잔의 운동을 계산하기 위해서 움직이는 계산격자를 써야 할 것인가? 만일 술잔이 벽면에 다가가 붙는다면 그 사이의 계산格子는 어디로 사라져야 할까? 만일 누군가 표면장력과 표면파까지도 엄밀히 계산해야 한다고 주장한다면 시뮬레이션은 더욱 불가능해진다.

이제 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 생각하자

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

위의 모멘텀과 연속방정식에서 $\mathbf{u}(u,v,w)$ 는 속도벡터, p 는 압력, ρ 는 밀도, \mathbf{g} 는 중력 가속도, μ 는 점성계수이다. 물리영역의 복잡성에 비추어 유한요소법을 사용한다. 위 식을 풀기 위하여 저자들에 의해 개발되고, 여러 문제들에서 정확성과 효율성이 검증된 DOLFINS(Drastically Operator-Lightened Finite-Element Implicit Navier-Stokes) 코드를 사용한다[5]. 이 코드의 방법에서는 식 (1)과 (2)에 걸러진 유한요소법을 써서 다음의 행렬식을 얻는다.

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{C} \mathbf{P} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$C^T U = 0 \quad (4)$$

여기서 U 는 미지변수벡터, M 은 질량 행렬, K 는 대류 및 확산 행렬, C 는 구배 행렬, C^T 는 divergence 행렬, F 는 힘벡터이다. DOLFINS 코드는 위의 식을 유한차분법에서 잘 알려진 PISO 방법[6]을 통하여, 한 시간 step에서 한 개의 예측자와 2개의 수정자를 사용하여 유한요소법으로 반복 없이 빠르게 풀게 된다. DOLFINS 코드의 자세한 것은 문헌 [5]에 나와 있다.

3. 포석정 수로의 흐름

Fig.6은 84700개의 표면격자로 이루어진水路의 수치적 형상모델을 보여준다. 이 수로의 내부에 있는 사진은 문헌 [4]에서 이전에 사용했던 실험 모델의 사진이다. 유동은 수로의 입구(폭L)에서 미리 정해진 균일한 속도 V_0 로 흘러 들어와서 출구에서 흐름 방향의 구배 없이 흘러 나간다. 유동은 수로에서 일정한 수위(水位)를 유지하고 자유표면에서 전단응력이 없다고 가정한다. 현재의 모델은 따라서 표면 중력파나 표면장력의 효과를 배제한다. 또한 현재의 흐름은 평면 수로에서 압력구배에 의해 유지된다고 가정한다. 수로의 벽면에서는 점착조건을 사용한다.

레이놀즈수 $Re = \rho V_0 L / \mu_s$ 는 실제水路에서 10^5 크기가 될 것으로 예측되나, 실험[4]에서는 500-3560의 범위에 있다. 여기서 μ_s 는 물의 점성계수이고, ρ 는 물의 밀도이다. 실험을 통하여 박리된 흐름의 크기는 레이놀즈수의 변화에 민감하지 않은 것으로 드러났다.

계산된 자유 표면의 속도벡터들은 Fig.7에서 레이놀즈수 500의 층류영역에 대하여 보였다. 이들은 실험적으로 레이놀즈수 2000정도의 난류 흐름에서 얻은 Fig.5의 와류 분포도와 매우 흡사하다. 즉, 레이놀즈수의 크기와는 큰 관계없이 박리된 와류영역이 정해졌다. 수로의 흐름은, 더 큰 레이놀즈수에서는, 주 흐름과 간헐적으로 혼합되는 박리영역의 흐름 탓으로 비정상(非定常)이 되었다. 같은 현상이 실험[4]에서도 관찰되고 촬영되었다.

수로의 굴곡진 부분 4군데 AB, CD, EF, GH를 Fig.7의 속도분포 그림중에 표시하였고, 이의 확대그림을 Fig.8의 (a), (b), (c), (d)에서 각각 한번 더 보여준다. 그림은 불규칙적인 수로 폭과 큰 곡율을 갖는 수로의 부분에서는 분명히 놀랄 만큼 큰 박리 영역이 있음을 보여준다. 이 유동 양상은 문헌[4]에 보인 표면궤적선들의 사진과 잘 비교된다. 수로의 바닥 근처의 속도는 바닥이 주는 항력 때문에 느려지고 자유표면과는 다른 속도 분포를 갖는다. 이 때문에 수로의 굽은 부위에서는 수로의 단면방향으로 2차 유동이 생기고, 따라서 전체 흐름은 3차원으로 변한다. 강물의 蛇行과 꼬임은 이런 종류의 유동 구조에 의해 생기는 것이다.

Fig.9(a)는 Fig. 7에서 C로 표시한 수로 단면에서, 물의 주 흐름 방향의 속도 분포를 색깔분포로 나타낸 것이다. 흐름의 속도는 벽면 근처에서 느리고 중앙부에서 빠르며, 속도가 빠른 중앙부의 중심은 수로의 바깥 쪽 쪽으로 치우쳐 있다. Fig.9(b)의 압력 분포는 단면 C에서 바깥쪽 쪽에 가까운 바닥 면에 있음을 보여준다. 이런 현상은 강물이 사행천에서 바깥쪽 쪽을 침식하고 안쪽 쪽에 토사를 퇴적하는 현상과 무관하지 않다. Fig.9(c)에서는 단면 C내에서의 2차 유동의 속도 분포를 보여준다. 이는 분명히 와류를 형성하고 있으며 강물의 꼬임을 유발하게 된다.

4. 슬잔의 유로

수로의 자유표면을 떠내려가는 슬잔은, 컴퓨터를 사용하여 유동을 계산하는 전산유체역학에서 “움직이는 경계 문제”라고 분류된 매우 어려운 문제를 야기한다. 실제의 슬잔은 깊이가 있어 3차원적이다. 슬잔의 크기가 수로의 폭에 비해 매우 작다고 생각하면 흐름은 슬잔의 운동에 영향을 주지만, 그 반대로 흐름의 운동은 슬잔에 의해 영향을 받지 않는다고 가정할 수 있다. 이때 슬잔을 점질량이라 생각하면 슬잔운동의 물리적 양상은 변하지 않은 채, 슬잔이 벽에 닿을 때 슬잔들레에서 계산격자가 소멸하는 특이현상을 피할 수 있게 된다.

점질량의 Lagrange 운동식은

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F = \frac{1}{2} C_D \rho A |V_f - V_p| (V_f - V_p) \quad (5)$$

이다. 여기서 m_p 는 점질량, C_D 는 항력계수, A 는 점의 단면적, V_p 와 V_f 는 각각 점과 물의 운동 속도를 나타낸다. 점질량과 관련하여 스토크(Stoker)수를 정의하면

$$St = \frac{m_p}{C_D \cdot \frac{1}{2} \rho A |V_f - V_p|} \quad (6)$$

이고, 이는 시간의 차원을 갖는다. 여기서 스토크 수는 점질량의 관성효과를 나타내며 “relaxation 시간”이라고 불린다. 상대 속도 $|V_f - V_p|$ 는 특성 속도로 대체될 수 있다. 식 (6)을 작은 시간 간격 Δt 에 대해 적분하면

$$V_p = V_f + (V_{p0} - V_f) \exp\left(-\frac{\Delta t}{St}\right) \quad (7)$$

이 된다. 여기서 V_{p0} 는 점질량의 초기 속도이다. 매우 작은 스토크 수에서 점질량은 거의 유체처럼 움직이지만, 매우 큰 스토크 수에서는 관성 효과에 의해 점질량의 유로가 주위 유체의 유선과는 상당히 다르게 된다. 다음과 같이 가정해 보자.

$$\mu \sim O(10^{-3}) \text{ N} \cdot \text{sec} / \text{m}^2$$

$$C_D \sim O(1)$$

$$A \sim O(10^{-1}L) \text{ m}^2$$

$$|V_f - V_p| \sim O(V_0) \text{ m/sec}$$

$$m_p \sim O(10^{-2}) \text{ kg}$$

그러면 스토커 수는 $100 \times (\text{레이놀즈수})^{-1}$ 이 된다. 여기서 스토커 수를 0.3으로 취하고, 점질량의 초기 위치를 다양하게 변하여 술잔의 유로를 계산하였다.

술잔의 유로는 술잔의 초기 위치와 술잔의 형상 변수들(질량, 단면적, 저항계수등)에 매우 민감하기 때문에, 불확실한 초기데이터를 가지고는 유로를 미리 정확하게 예측할 수 없다. 그러나 일반적으로 술잔은 원심력 때문에 굴곡부분에서 바깥쪽 쪽에 가까운 유로를 취하며, 바깥쪽 쪽에 散在하는 큰 와류의 영역에 포획될 가능성이 있다. 또한 많은 경우에 이 와류영역에서 포획되어 맴돌던 술잔은 자신의 관성력과 박리된 와류 영역의 간헐적인 갑작스런 축소 등의 이유에 의하여 와류 포획에서 벗어나게 된다. 그러면 술잔은 주 흐름의 하류로 흘러가서 다른 와류 박리 영역에 다시 포획될 수 있다. 물론 술잔은 와류 구역에 끝까지 붙잡힘이 없이 떠내려가서 출구로 나갈 수 있다.

이런 예측은 문헌 [4]에서 이루어진 실험 관측과 완전히 일치한다. Fig.10(a)는 점 P1에서 출발한 술잔이 위치 P2에서 포획되었다가 탈출하여 하류의 와류위치 P3에서 재 포획됨을 보여주고 있다. Fig.10(b)에서는 P1에서 출발한 술잔이 와류 P2에서 영구히 포획되고, P3에서 재출발시키면 바깥쪽 쪽을 따라 출구까지 끝까지 흘러감을 볼 수 있다. 줄여 말하자면 술잔이 도달하는 시간은 많은 경우에 이런 식으로 연장된다. 또 너무 한쪽의 와류 구역에 붙잡혀 오래 지체하게 되면 누군가 술잔을 밀어내어水路의 주 흐름속으로 밀어내야 할 때도 있는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 고대의 曲水之宴에 쓰이던 한국의 포석정의 3차원 수로 흐름을 계산하였다. 이水路는 기능이 정지되었기 때문에 자세한 유동의 흐름을 알고자 할 때에는 컴퓨터를 이용한 수치적 시뮬레이션만이 유일한 해법이 된다. 표면장력, 자유표면 효과, 난류, 낙차의 효과를 무시하고 술잔을 점질량으로 대체했음에도 불구하고 수년전 수행한 모델 실험과 흡사한 유동 구조, 박리 와류 영역, 술잔의 유로를 계산할 수 있었다. 술잔의 유로는 수로의 흐름 속도, 술잔의 형상 변수, 술잔의 초기위치 등, 未知이거나 임의적인 매개변수의 영향으로 미리 정확하게 예측할 수는 없다. 이 不豫測性이야말로 曲水之宴의 作詩유희에서 술잔의 운동을 오랫동안 지켜보게 만드는 가장 흥미 있는 유체역학적 요소라고 할 수 있다.

이 연구를 통하여 중국, 일본, 그리고 한국에서의 曲水에 관한 역사적 문헌을 비교할 수 있게 되었고 포석정 흐름의 유동 구조에 관하여 새로운 지식을 추가하였다. 이 흐름 특성은 동아시아의 여러 나라에 흩어져 있는 流觴曲水에서 상당 부분 공통적일 수가 있다. 그러나 포석정에서는 두군데 정도에서 인위적으로 심한 굴곡을 설계하여 줌으로써 중국의 것과는 달리 파격적인 비대칭성을 분명히 도입하였고, 이로써 흐름 및 술잔의 유로가 매우 특이하고 흥미롭게 되었다. 이 연구를 통하여 저자들은 우리의 선조들이 즐겼던 흐름의 많은 부분을 재 구축할 수 있었고, 심지어 曲水之宴동안에 일어났던 취흥과 서정까지도 되살려 낼 수 있었던 것은 큰 보람이었다.

감사의 글

저자들은 일본 도쿄의 미래 기술 연구소의 Yasuki Nakayama 교수에게 감사드린다. 그의 자택에 초대되어 일본의 유상곡수에 관하여 논의했을 뿐만 아니라 문헌과 사진까지도 받았다. 또한 중국

북경의 중국과학원의 Naixing Chen 교수에게도 그가 수집하여 보내 준 귀중한 자료에 대하여 감사 표시한다. 또한 미국 펜실바니아 주립대의 함인영 교수께서 이 분야 연구에서 오랫동안 우리에게 보여주신 관심과 격려를 잊을 수가 없다. 끝으로 이 논문의 영문판이 Pergamon 출판사의 Atlas of Visualization, 1996년 판에 전문개재되어 출판될 예정임을 밝힌다.

참고 문헌

1. 趙 洛, “流杯亭”, 北京日報 칼럼, 1992. 5. 22
2. 作島卓一, 營造法式의 研究, 1권 14절, pp.196-205, 中央公論美術出版, 東京, 1970
3. 中山泰喜, 青本克己, 沖眞, “曲水の宴の 流體力學的 考察”, 可視化情報, 14권, 증보1호, 1994년 7월, Japan
4. 蔣根植, “慶州 鮑石亭 流觴曲수에 關한 流體科學的 考察”, 美術資料 제46호, pp.101-110, pp.114-115, 국립중앙박물관, 1990, Korea
5. Shim E. B. and Chang Keun-Shik, “Three-Dimensional Vortex Flow past a Tilting Disc Valve using a Segregated Finite Element Scheme”, CFD Journal, Vol.3, No.1, pp.205-222, 1994, April, Japan
6. Issa R, “Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting”, Journal of Computational Physics, Vol.62 , pp.40-65, 1986

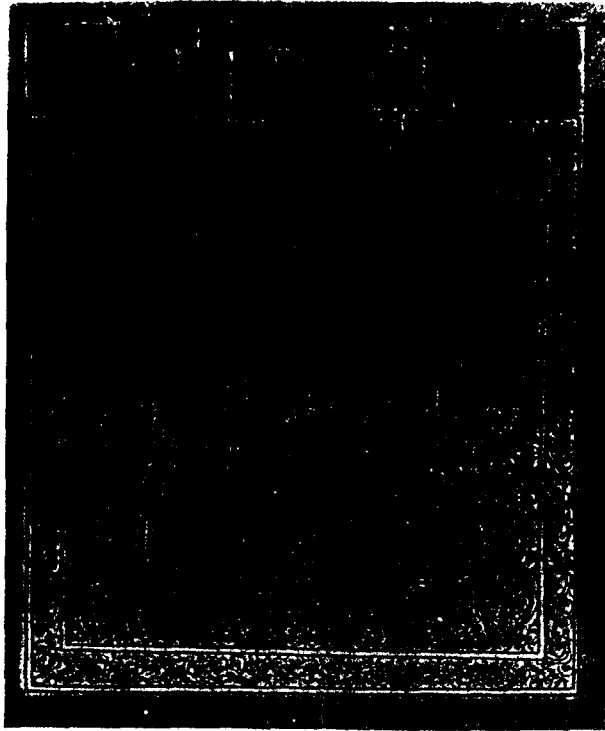


Fig.1 A decorated Curved Water Channel in Ying Tsao Fa Shih
(before 12th century).

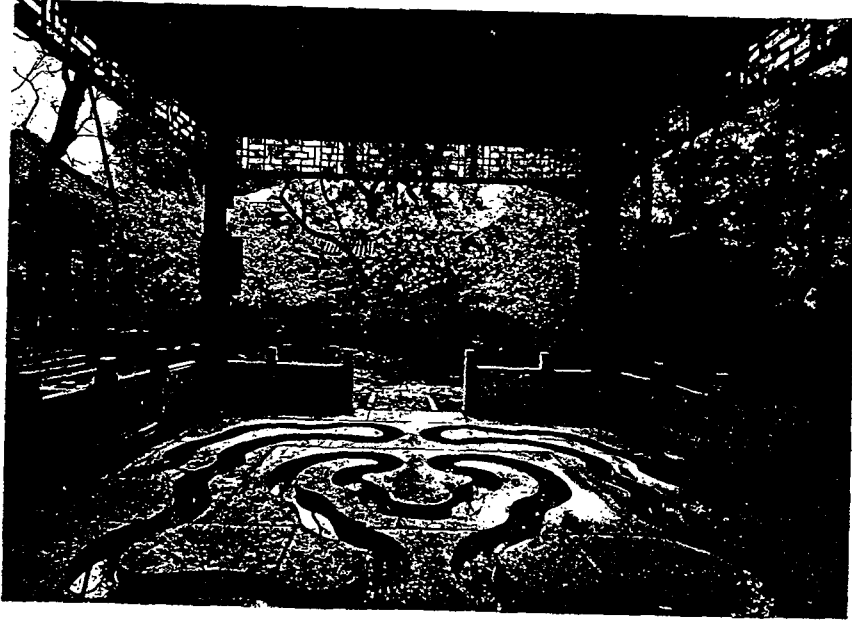


Fig.2 Ya Shang Ting in the Forbidden City (Ming dynasty).



Fig.3 The Curved Water Feast performed in Jyonan-gu, kyoto, Japan (Nov.3, 1993) - by Courtesy of Prof.Y.Nakayama.



Fig.4 The defunct Posuk-Chung remains (Constructed before A.D.879).

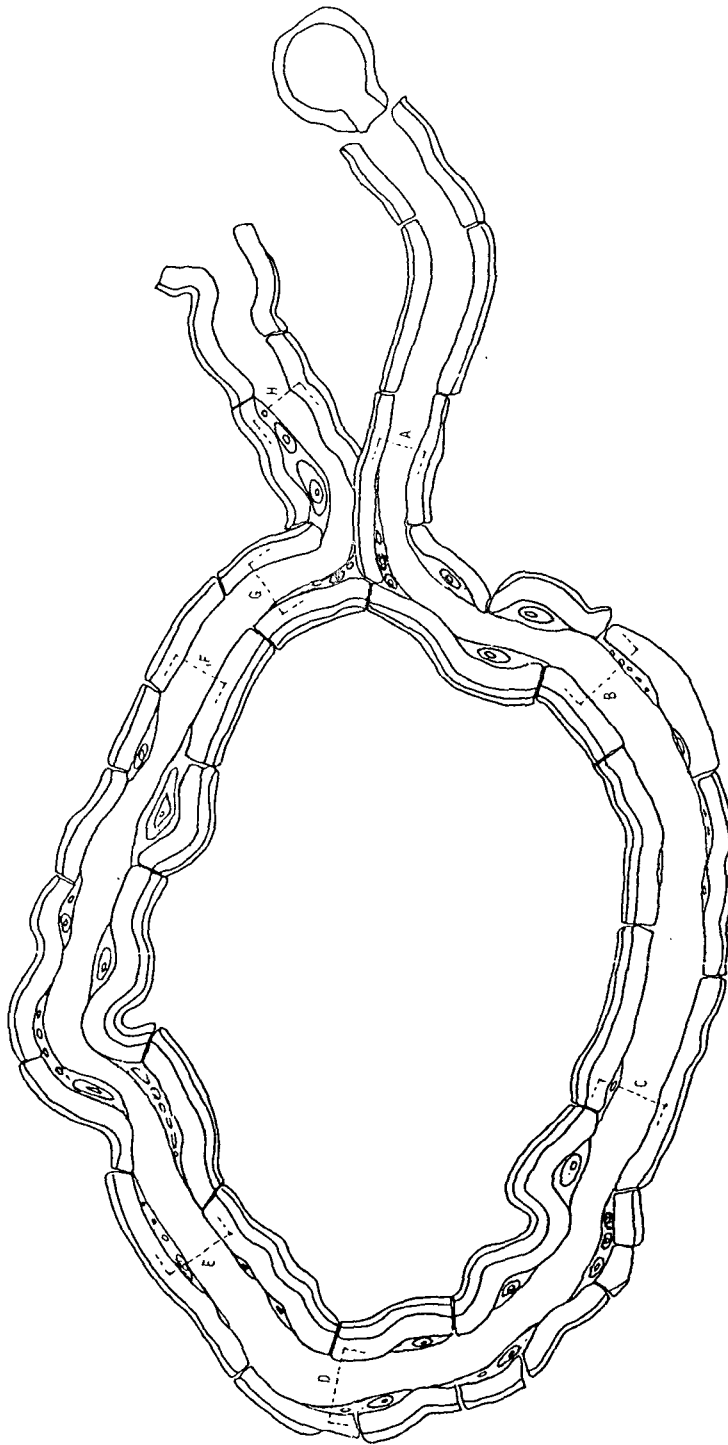


Fig.5 The separated vortex regions from the model experiment, Ref.[4].

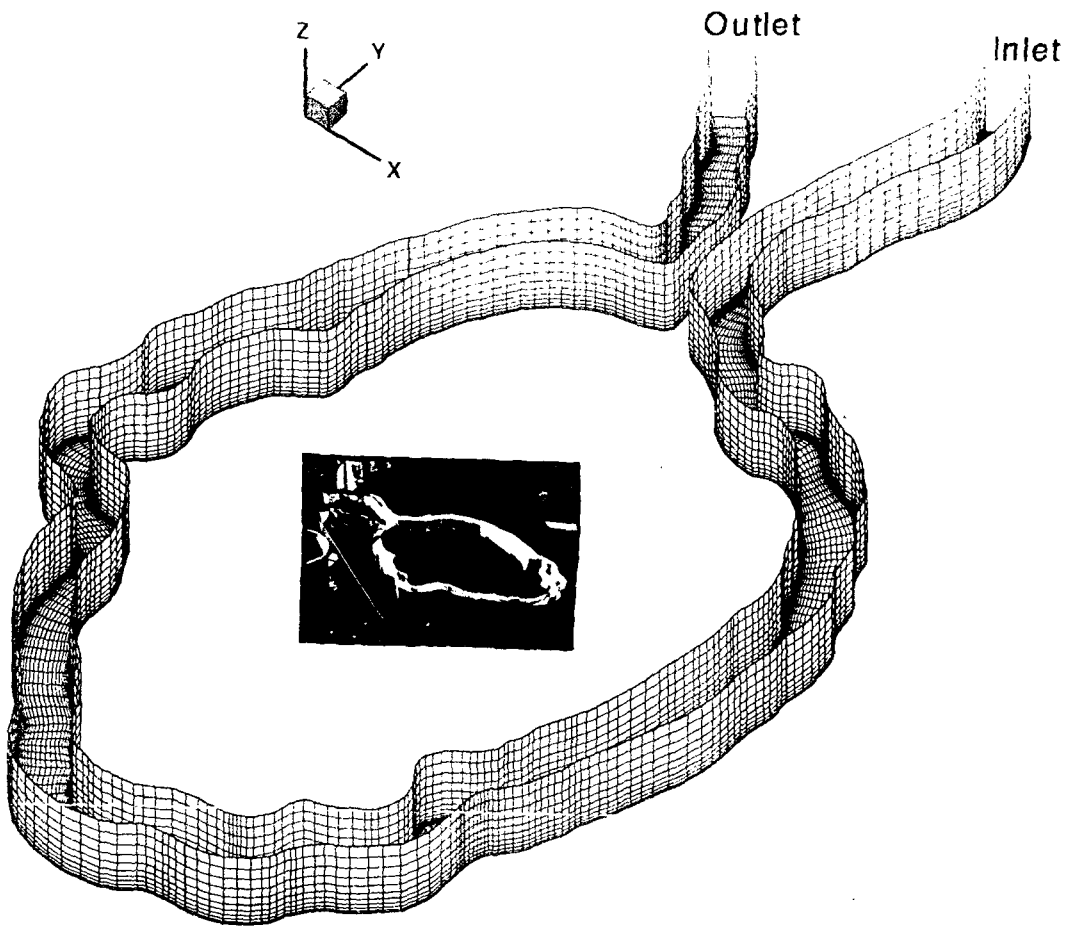


Fig.6 Numerical water channel with surface grid (Inside of the channel is the experimental model used in Ref.[4]).

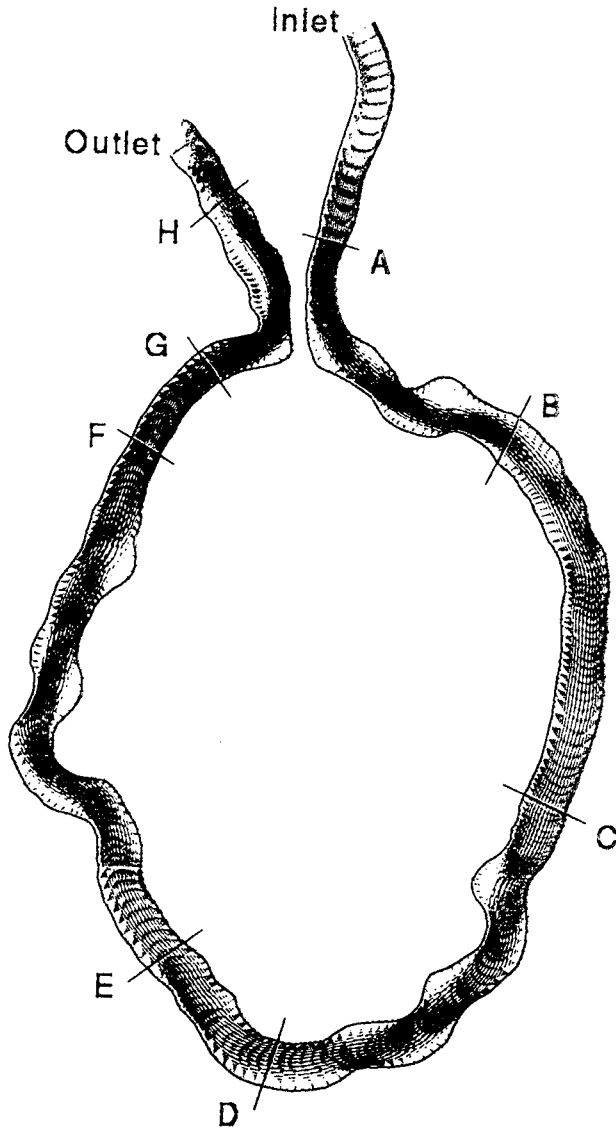


Fig.7 The velocity vectors on the top surface, $Z=H$.

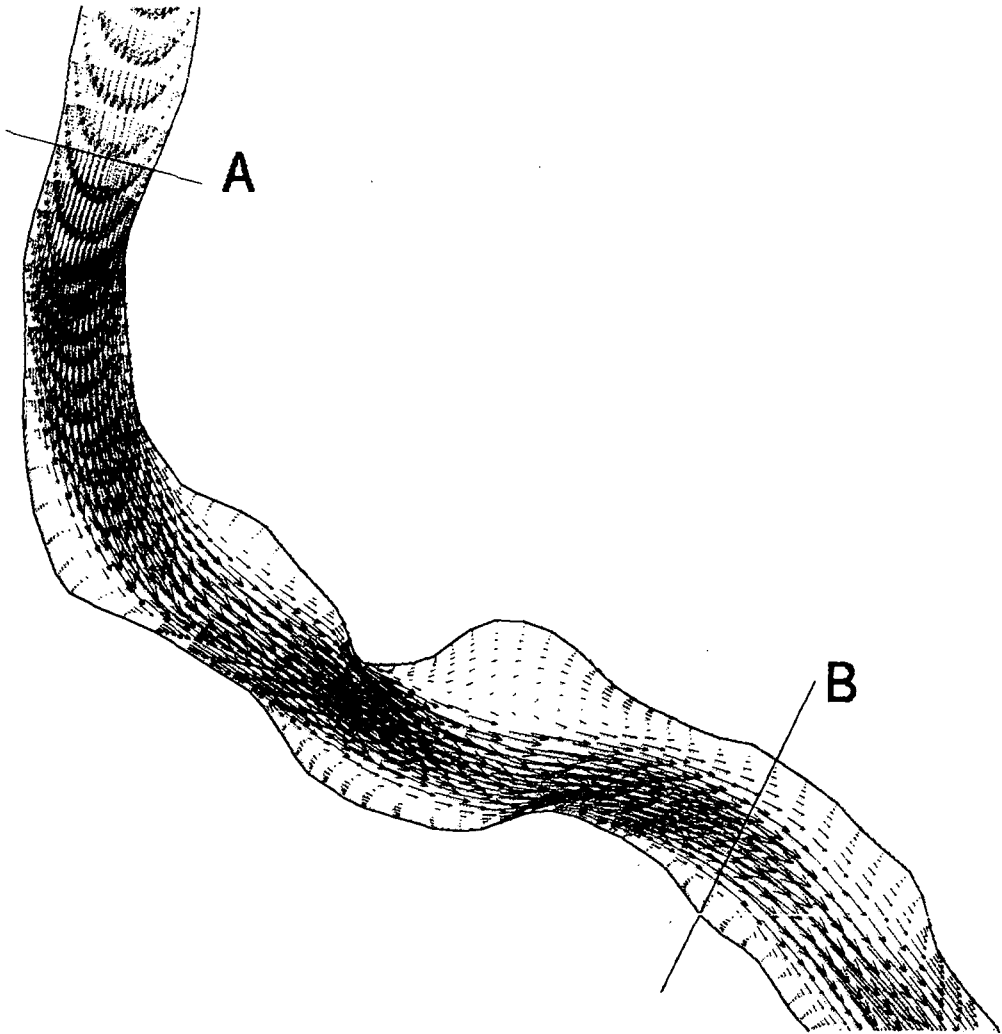


Fig.8(a) Surface velocity vectors in Section AB.

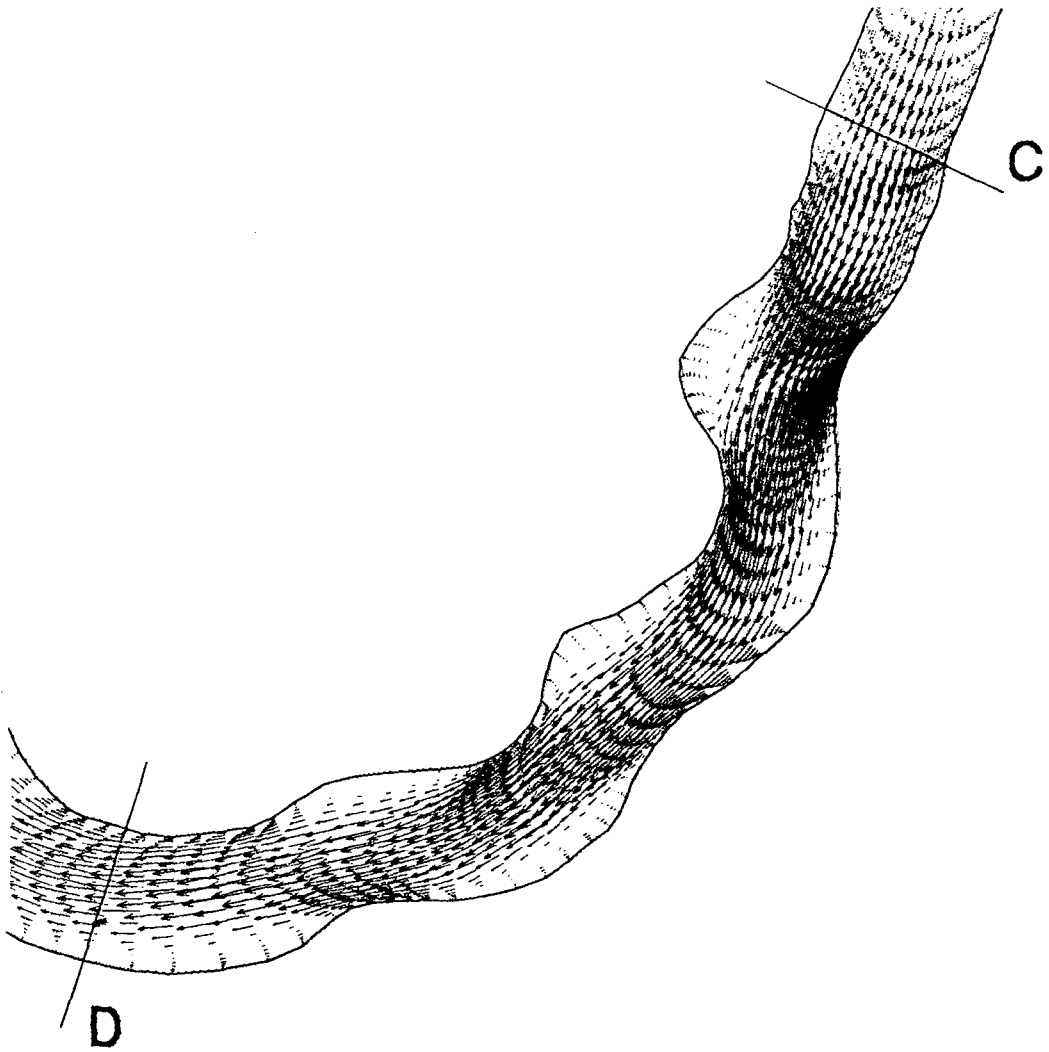


Fig.8(b) Surface velocity vectors in Section CD.

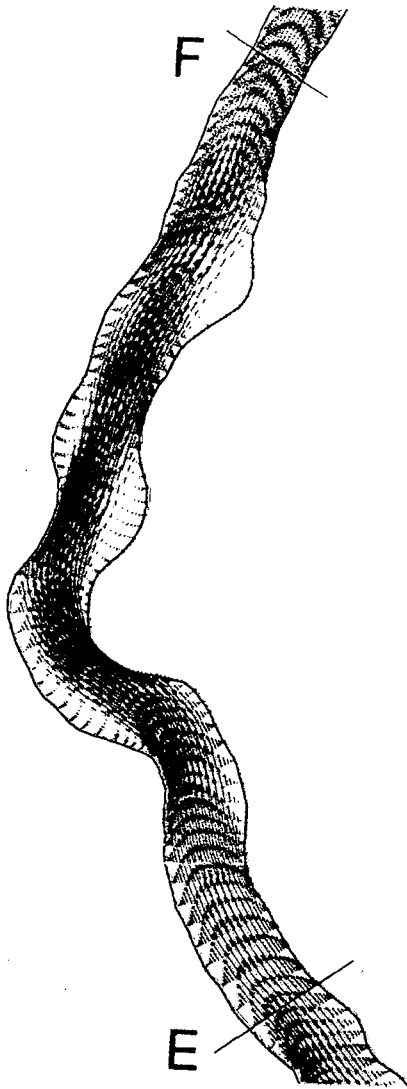


Fig.8(c) Surface velocity vectors in Section EF.

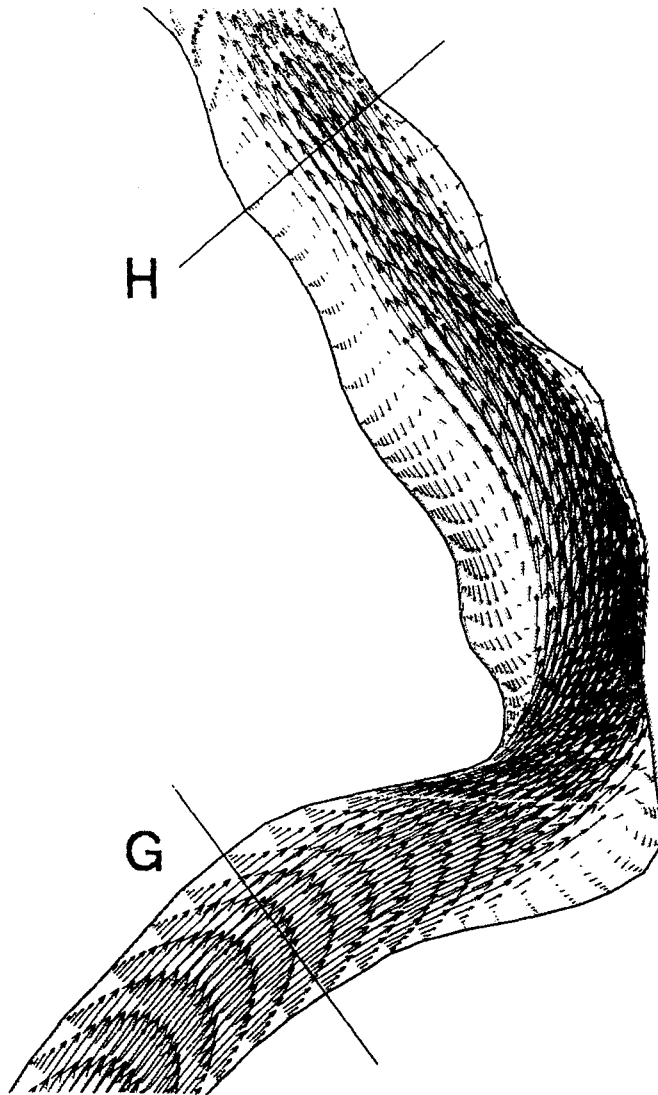


Fig.8(d) Surface velocity vectors in Section GH.

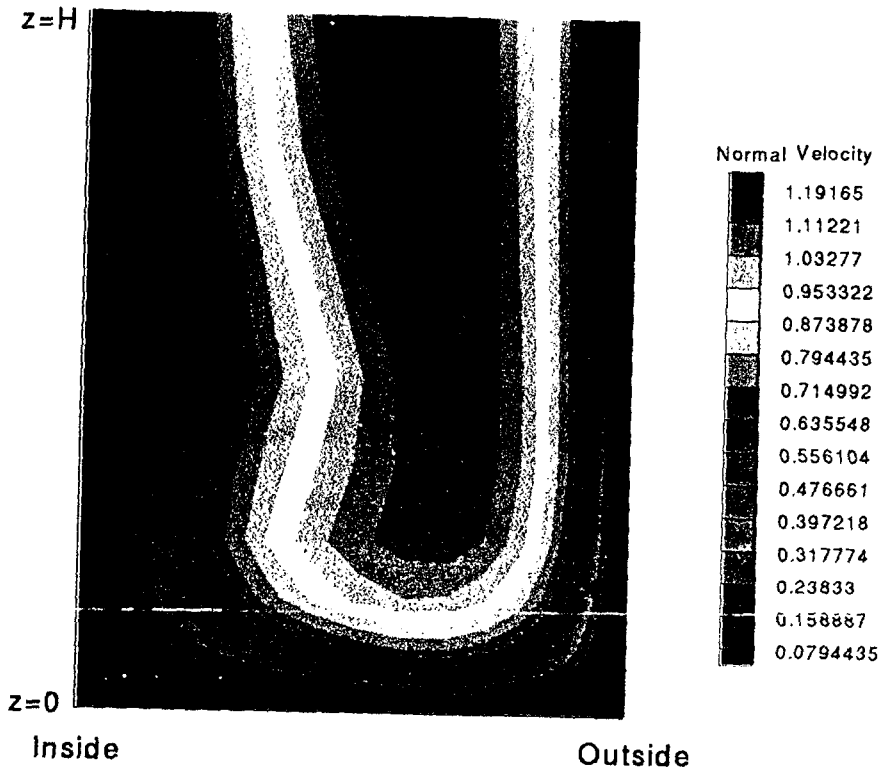


Fig.9(a) Cross-sectional velocity distribution in the C-plane.

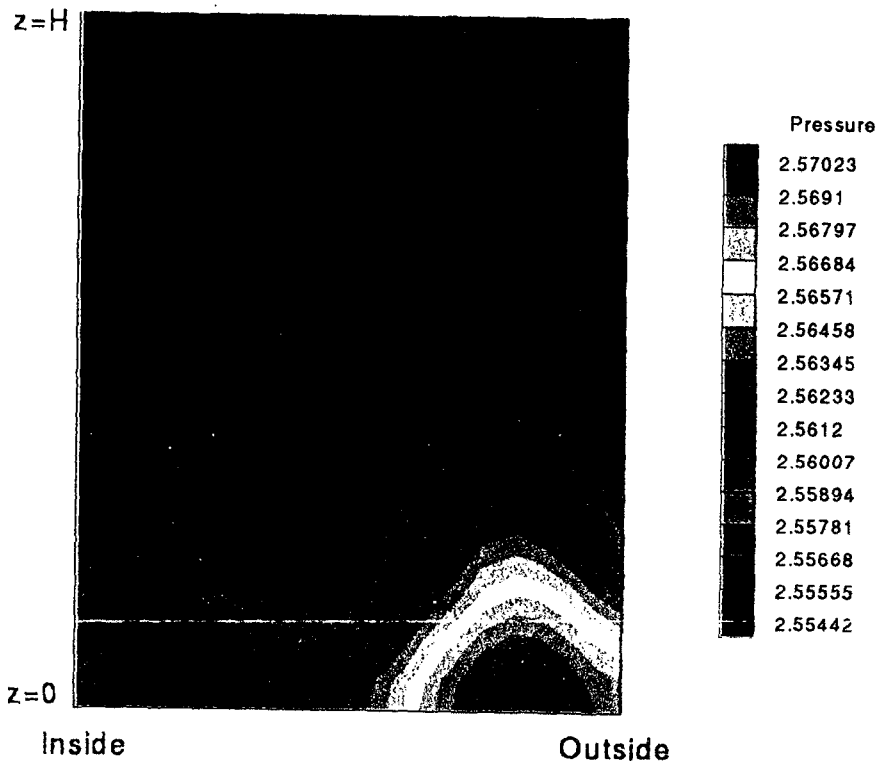


Fig.9(b) Cross-sectional pressure distribution in the C-plane.

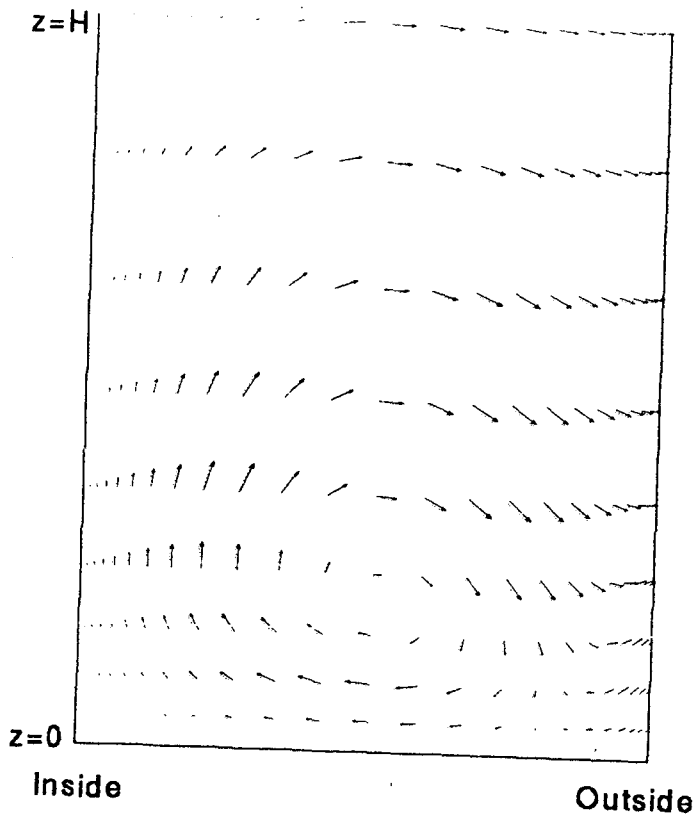


Fig.9(c) Cross-sectional view of the secondary flow in the C-plane.

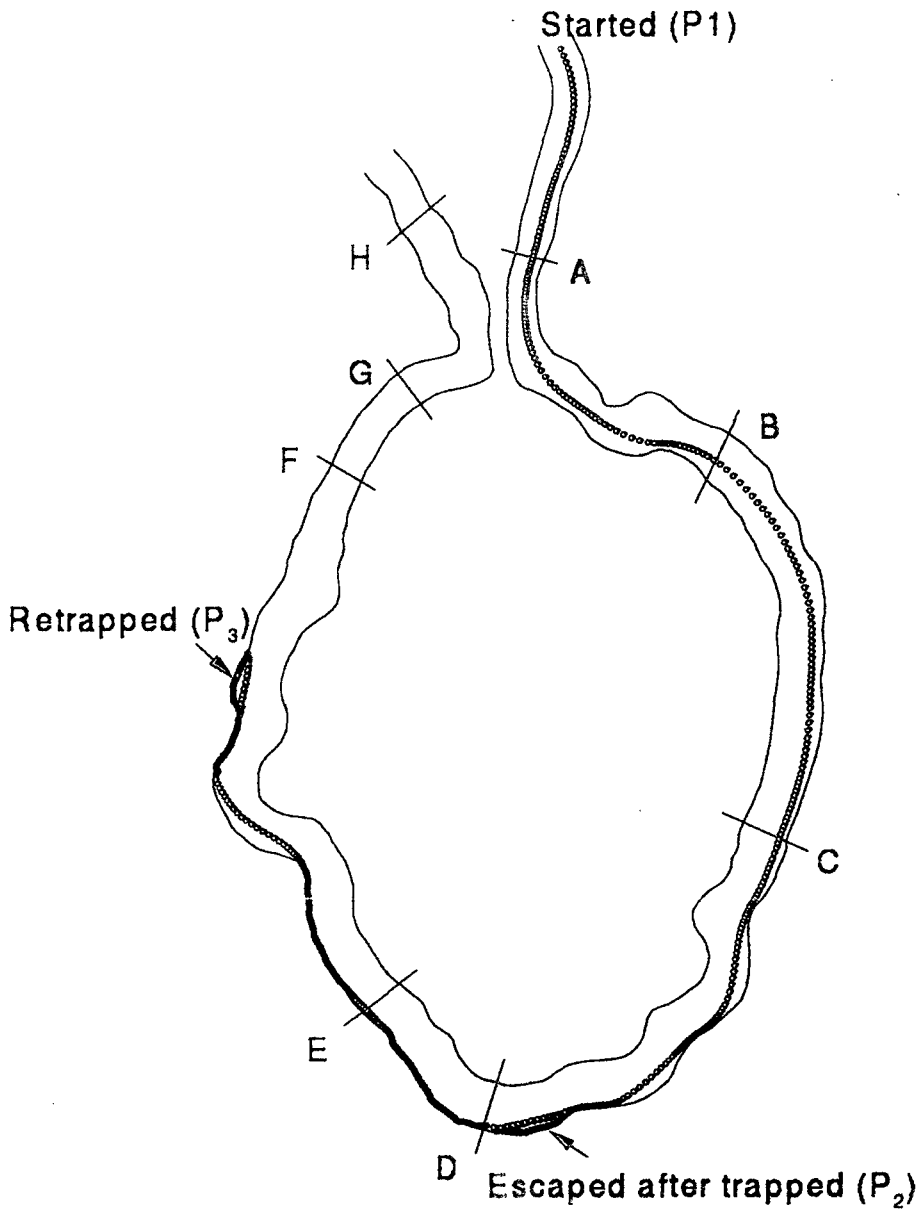


Fig.10(a) Trajectory of a receptacle(I).

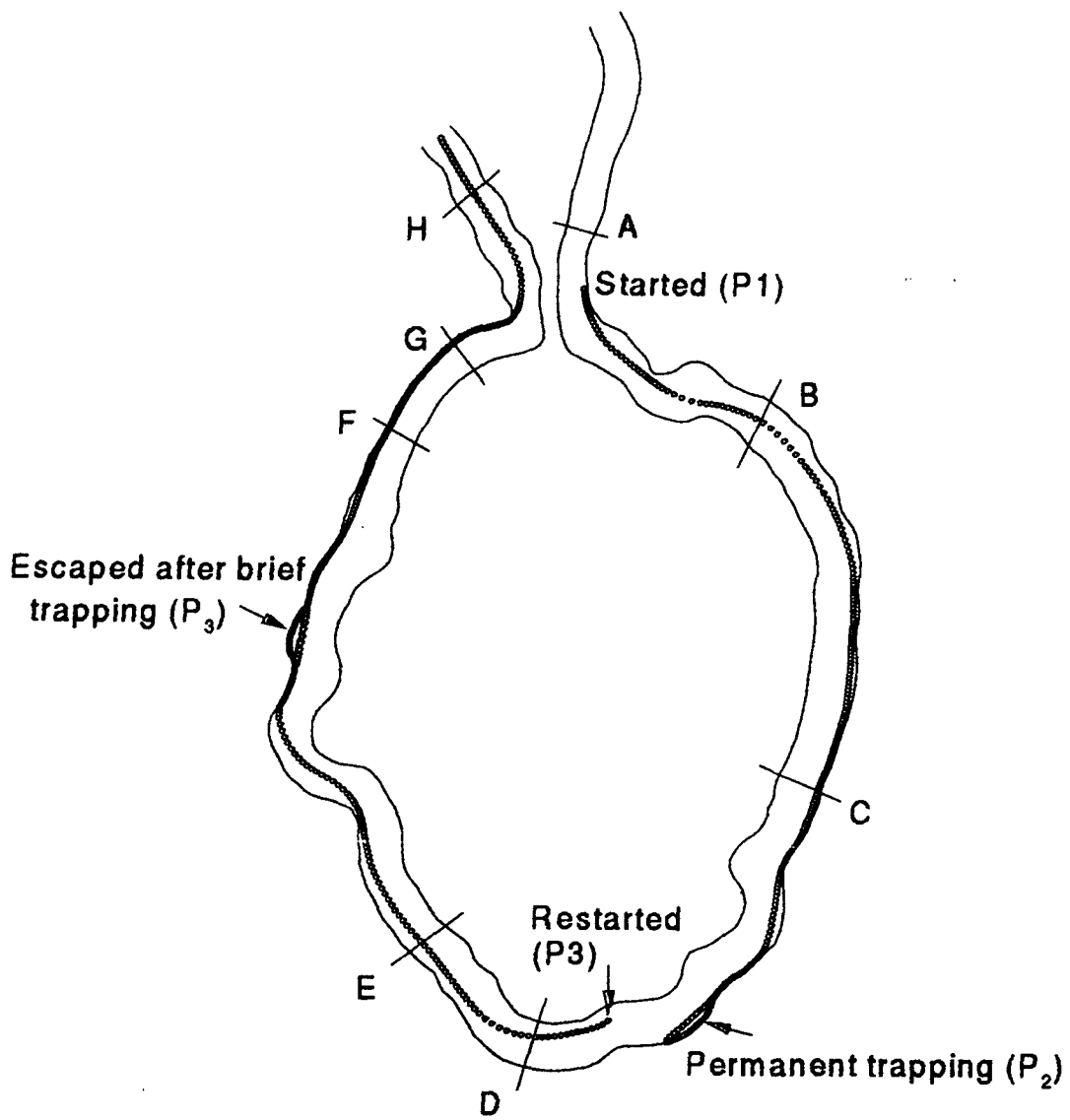


Fig.10(b) Trajectory of a receptable(II)