

## 보텍스(VORTEX)의 개요

### 1.1 강제보텍스와 자유보텍스

가장 간단한 평면 보텍스인 원형(圓形) 보텍스에는 두 가지 기본형태가 있으며, 간단히 두 종류의 실험으로 설명할 수 있다. 첫 번째 실험에서 원반과 같은 고체가 그 중심을 지나가는 축 주위로 일정하게 돈다(그림1.1a). 이러한 운동에서는 원반위의 점들의 속도가 중심으로부터의 거리에 따라 선형적으로 증가 한다(그림1.1b). 다음으로, 원반이 상자처럼 비어서 속이 유체로 가득 차 있다고 생각한다. 실험이 계속되면 과도 시간이 지난 후 유체는 벽에 대한 점착성 때문에 고체처럼 회전한다. 그러므로 유체의 속도도 또한 회전중심으로부터의 거리에 따라 선형으로 증가하며, 각속도는 유체내의 모든 곳에서 일정하다. 이와 같은 방식으로 회전하는 유체운동을 “고체회전”이라 하며, 강제보텍스(forced vortex)라고 부른다. 이는 유체운동이 정상적(正常的)일 때에만 발생한다. 운동의 시작으로부터 정상상태에 이르는 과도기에는 유체는 진동할 수도 있고, 복잡한 모양으로 운동할 수도 있다. 유체와 고체 사이의 이러한 차이는 달걀이 삶아졌는지 아닌지를 검사하는 방법으로 이용된다. 달걀이 삶아지지 않은 날것일 때는 팽이처럼 돌지 못하지만, 삶아져 고체가 되면 그것이 가능하다.

접선방향의 속도 형상을 변화시키지 않고 균일한 병진운동을 고체적 회전에 중첩시킬 수 있다. 축과 평행한 방향으로 일정한 속도 성분을 가지면 입자들은 나선형으로 움직인다(그림1.2).

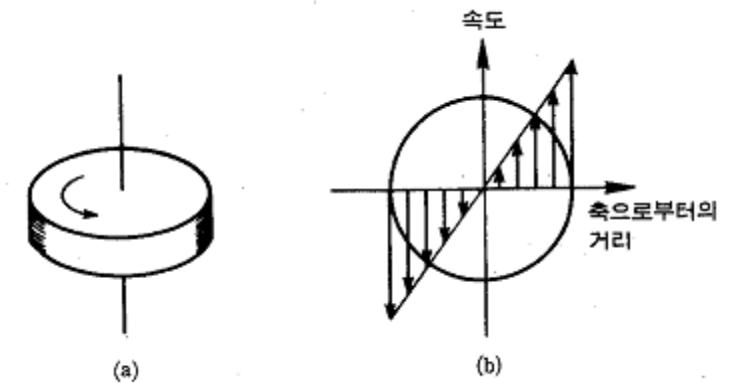


그림1.1 (a) 회전하는 고체(강제보텍스) (b) 강제보텍스에서의 속도분포

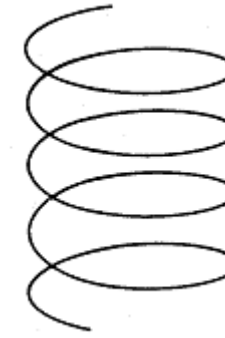


그림1.2 강제회전 강제보텍스의 축방향 이동(경로선은 나선)

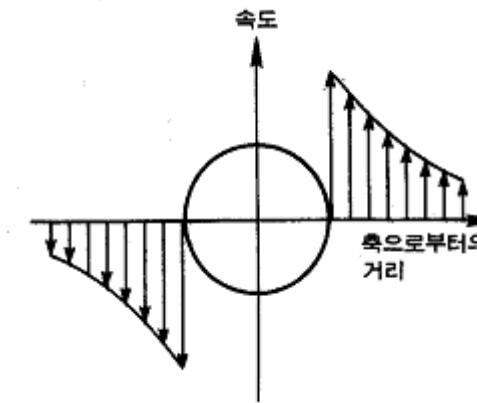


그림1.3 자유보텍스에서의 속도 분포

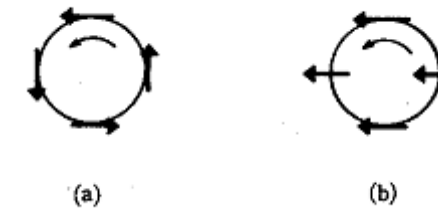


그림1.4 막대의 움직임 : (a) 강제보텍스, (b) 자유보텍스

유체는 정상(定常) 상태에서도 고체가 할 수 없는 회전운동을 할 수 있다. 긴 원형 봉(棒)이 중심축 주위를 균일한 속도로 유체 내에서 돌고 있다(그림1.3). 유체는 봉에 접촉되므로 봉의 표면에서 가장 큰 속도 즉, 봉과 같은 속도를 갖는다. 봉으로부터 멀어짐에 따라 속도는 거리에 반비례하여 감소한다. 이러한 유체운동을 “자유 보텍스” 이라고 하며 회전 중심을 제외하고는 와도가 없다.

보텍스운동의 두 가지 형태인 강제회전 운동(강제 보텍스)과 자유 보텍스는 본질적으로 서로 다르다. 강제회전에서 유체입자들은 회전 목마에 비유될 수 있는데, 목마는 회전하는 원반에 고착되어 있으므로 원반이 한 바퀴 돌

때마다 이들도 축 주위를 한바퀴 돈다(그림1.4a). 고체회전에서 각속도가 일정함은 전체 유체에서 와도가 일정함을 의미한다. 즉, 고체회전에서 각속도와 와도는 일정하다.

만일 물로 가득 채워진 용기에 자유 보텍스가 있고 여기에 작은 막대들이 물의 표면에 떠있다면, 이 작은 막대들은 원형경로(회전중심은 제외)를 도는 동안 그 방향을 바꾸지 않는다. 이 막대들은 자신의 축을 중심으로 돌지 않으며, 단순한 원형 병진운동을 한다(그림1.4b). 즉, 자유 보텍스는 중심부의 바깥에서는 와도가 없다. 그러나 중심은 와도를 가지고 있다. 붓은 유체로 가득찬 원통으로 대체 될 수도 있다. 이 때 원통 내부의 속도 분포는 바뀌지 않는다(그림1.5). 자유 보텍스와 고체회전이 복합된 유체운동을 유체 역학자 Rankine의 이름을 따서 “ Rankine 보텍스” 라고 부른다. 회전평면에 수직인 속도 성분이 없는(가정된 것임) 정상 원형 운동에 대해서, Rankine 보텍스는 중심부에서 아주 멀리 떨어진 곳 뿐만 아니라 중심에서도 속도가 영(零)인 유일한 보텍스이다.

Rankine 보텍스는 보텍스의 직경을 정의 하는데 유용하다. 와핵(渦核)의 직경을 정확하게 정해줄 수 있지만, 보텍스의 직경에 대한 정의는 아주 임의적이다. 보텍스의 반경은 보통, 중심으로부터 그 속도가 최대 속도에서 어떤 비율까지 감소하는(예를 들어 5%) 지점까지의 거리를 말한다.

고체 와핵의 반경이 한 점으로 줄어들면 “ 와선(渦線)” 이 얻어진다. 회전중심을 제외한 전체 유동장에서는 와도가 없는 반면, 중심에서의 와도는 무한대이며 순환(循環)이 유한하다. 와선은 특수한 와도선(渦度線) 즉, 와도가 무한대인 고립된 와도선이다. 그림2-11에서 속도 벡터를 와도 벡터로 생각하면 유선은 와도선이 된다. 와도선의 묶음은 “ 와도관(渦度管)” 으로 둘러 싸여진다. 고립된 와도관을 “ 와관(渦管)” 이라고 하는데, 이는 “ 와섬유(渦纖維)” 를 에워싸고 있다. 묶음 내의 와도선은 무한 값을 가질 필요는 없다. 따라서 Rankine 보텍스는 와섬유이다.

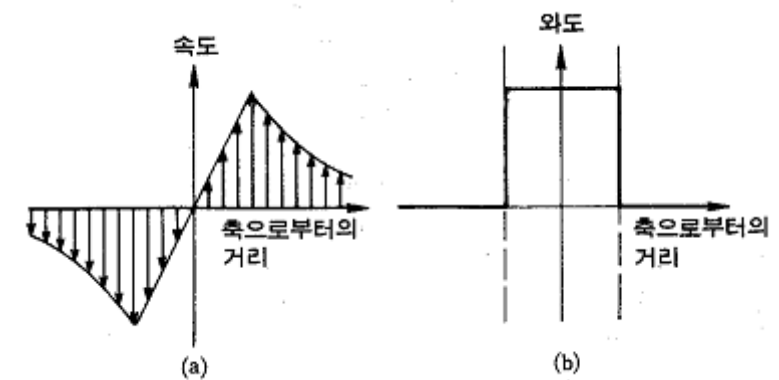


그림1.5 Rankine 보텍스 (a) 속도분포, (b) 와도분포

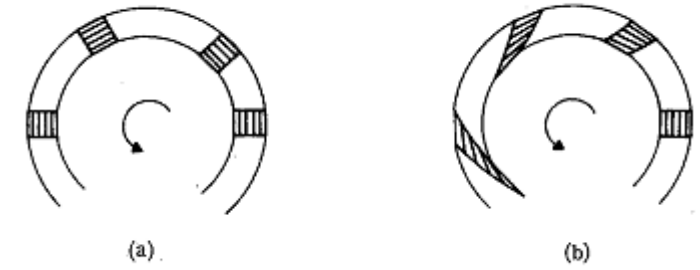


그림1.6 유체입자의 거동, (a) 강제보텍스, (b) 자유보텍스

평면 보텍스의 두 가지 기본형은 또 다른 측면에서 서로 다르다. 고체회전 내의 모든 입

자들은 유체와 함께 돌아가는 관찰자에 대해서 정지에 있는 반면에, 자유 보텍스 내에서 동심유체 층들은 서로 마찰한다(그림1.6). 이것은 다음 실험에 의해 설명된다. 천천히 돌아가는 물의 표면 위에 정사각형 모양으로 분말을 뿌린다. 고체회전하는 강제보텍스에서는 정사각형이 그 모양을 바꾸지 않는다. 그러나 자유 보텍스에서는 전단력이 작용하여 평행사변형으로 변형되어 마침내 완전히 분해된다. 또한, 천천히 돌아가는 봉에 의해 점성유체 내에서 자유 보텍스가 생성되고, 위와 비슷하게 정사각형이 분말로 표시되면, 정사각형이 찌그러져 형태를 알아 볼 수 없게 된다. 만일 이 순간 유동 방향이 역전되면 마치 영화가 거꾸로 돌아가는 것처럼 원래의 정사각형이 되살아난다.

고체회전에서는 아무런 전단력도 생겨나지 않으므로 그 모양을 유지하기 위한 에너지가 필요 없다. 이와는 반대로 예를 들어 모터로 가동되는 봉은 입자들의 마찰을 가능하게 하기 위하여 자유 보텍스에 일정한 운동에너지를 공급해야만 한다. 운동에너지는 유체 내에서 열로 전환 된다. 이 과정을 “소산(消散)” 이라 한다. 따라서 Rankine 보텍스에서 자유 보텍스는 원통에 대하여 일을 요구한다. 만일 진공 속에서 고체회전이 일어나면 에너지의 공급없이 회전이 유지된다. 따라서 고체, 액체 그리고 기체로 된 천체나 인공위성, 우주선등은 처음 각운동량을 받는 순간부터 계속 회전한다.

봉이나 원통을 갑자기 유체 바깥으로 빼내면, 유체운동은 입자들이 서로 마찰하는 동안 약화된다. 봉을 통해 더 이상 에너지가 전달되지 않으므로 보텍스는 점차 소멸된다.(그림 1.7). 이렇게 변화하는 회전은 시간에 종속적이므로 두 가지 기본형 가운데 어느 것도 아니다. 즉, 그것은 고체회전도 아니고 자유 보텍스도 아니다.

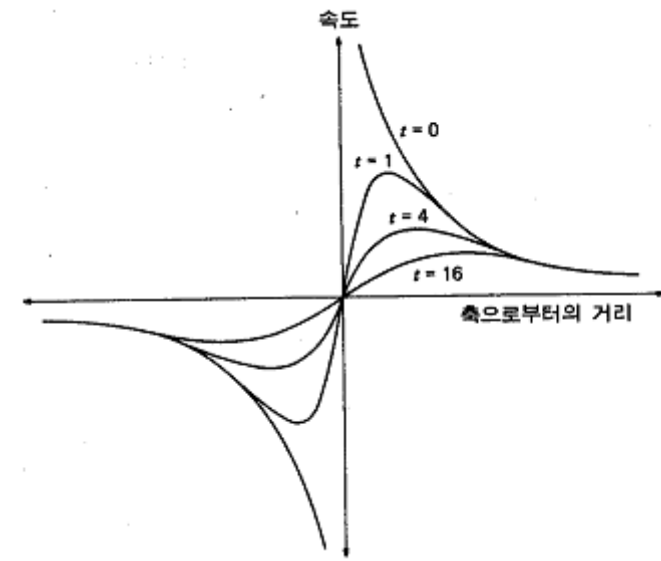


그림1.7 자유보텍스의 감쇠(회전축 근처에서 유체는 회전하는 고체처럼 행동함, 시간  $t$ 는 무차원 단위임)

시간에 독립적이고 따라서 어딘가에서부터 연속적으로 운동 에너지를 공급받는 그림1.7과 같은 형태의 보텍스가 존재한다면 이러한 보텍스는 반경 방향의 속도 성분과 또한 질량 보존의 법칙에 따라 축 방향 속도 성분도 갖는 경우에만 존재할 수 있다. 이 경우, 에너지는 외부로부터 보텍스로 공급된다. 나선형 보텍스인 욕조 보텍스(bath vortex)가 한 예이다.

회전에 대해 완벽하게 묘사하려면 속도형상 뿐 아니라 압력분포도 필요하다. 회전매체의 종류가 다른 점은 보텍스운동의 특성에 아무런 영향을 미치지 못한다. 예를 들어 고체 회전의 경우, 중심으로부터의 거리에 따르는 속도 증가는 공기 뿐 아니라 물에서도 선형적이다. 매체의 차이는 발생하는 힘의 크기나 보텍스가 소멸하는 시간을 결정해주는 물질 상수로 표현된다. 예를 들어 물의 점도는 공기보다 약 100배 크다. 따라서 자유 보텍스를 물 속에서 일정한 속도로 유지하려면 공기에서보다 100배 더 많은 일을 해주어야 한다.

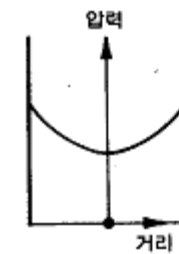


그림1.8 고체회전에서의 압력분포 작용하는 힘

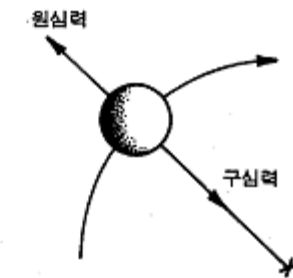


그림1.9 원운동하는 구에 작용하는 힘

보텍스 내의 압력은 균일하게 일정한 것은 아니다. 예를 들어 회전하는 상자와 같은 고체회전에서 중심으로부터 거리에 따라 측정하여 그린 압력분포는 포물선이다(그림1.8). 입자가 중심에서 멀리 있을수록 원심력이 더 크므로, 압력은 상자벽 쪽으로 갈수록 증가한다. 즉, 끈에 공을 달아 돌리면, 같은 각속도에서 끈의 길이가 길수록 끈을 잡아 당기는 힘이 커진다. 이 원심력에 대항하여 평형을 유지하려면 똑 같은 크기의 구심력이 작용해야만 한다(그림1.9). 끈을 놓으면 공은 원형 경로의 접선 방향으로 날아간다. 지구 주위의 달과 위성도 또한 중력과 원심력이 평형 상태에 있음을 나타낸다. 로케트로 위성에 제동을 걸어 원심력을 줄이면, 중력이 지배하게 되어 위성은 더 작은 궤도로 들어가거나 지상으로 떨어진다. 회전하는 유체에서 상자의 벽은 유체가 흩어지지 못하게 막아준다. 유체가 전체적으로 같은 밀도를 갖는 한 이 평형은 존재한다. 그러나 예를 들어, 기름을 떨어 뜨린다거나, 공기 중에 떠 있는 먼지와 같이 유체 내에 더 무겁거나 가벼운 입자들이 존재하면 힘의 평형은 교란된다. 무거운 입자는 상자 벽 쪽으로 날아가고 가벼운 것들은 중심부에 모인다. 원심분리기와 먼지 분리기의 원리는 이러한 현상에 기초를 둔다. 우유의 원심분리기에서 지방이 많아 가벼운 크림은 더 무거운 탈지(탈지) 우유로부터 분리된다. 먼지 분리기에서는 기체나 공기가 무거운 먼지 입자들로부터 분리되어 깨끗해진다. 자연에서는 회전하는 별에서 어마어마한 규모로 무거운 물질과 가벼운 물질의 분리가 일어난다.

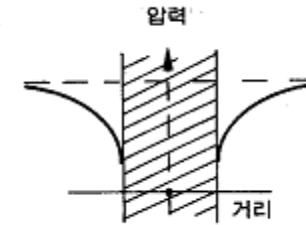


그림1.10 자유보텍스에서의 압력분포  
보텍스에서의 압력분포

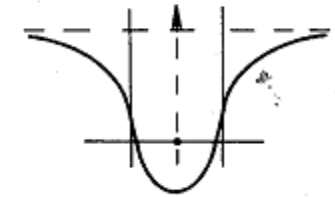


그림1.11 Rankine 보텍스에서의 압력분포

자유 보텍스에서도 압력은 중심으로부터의 거리에 따라 증가한다. 그러나 고체 회전과는 대조적으로 중심 부근에서 가장 증가가 크다 (그림1.10), 보텍스의 두 가지 형태에 대한 곡선을 결합하면 Rankine 보텍스의 압력 분포가 된다 (그림1.11), 여기서는 원통의 내외벽에서 압력이 같다고 가정하였다. 감쇠하는 보텍스(그림1.7)에 대한 압력 분포는 그림1.11에 나타난 것과 유사하다.

물에서 보텍스의 중심 압력은 물에 용해되어 있는 기체들이 분리되거나 실온에서도 물이 기화할 정도로 크게 감소할 수 있다. 이것을 “캐비테이션”이라 부른다. 회전축 주위에는 가스나 공기의 캐비테이션(일종의 空洞의 核)이 발생하는데 이것은 쉽게 식별될 수 있다. 자유표면이 있는 물의 소용돌이에서 공기와 물의 접촉면은 보텍스의 공동 핵(空洞核)으로 침투한다 (그림1.13). 교란을 유발시키는 장애물이 없는 데도

물의 자유표면에서 때때로 썰기형 파동이 관찰된다. 이러한 “유령 파”는 갑작스런 돌풍 내의 보이지 않는 회오리 바람에 의해 발생된다. 회오리 바람은 그 중심에서 자유표면을 볼록하게 하며, 이것이 물 위로 퍼질 때 이 교란은 썰기 꼴의 “파도”를 발생시킨다.

### 1.2 물통 실험

회전 상자에 대한 실험을 약간 바꾸어 상자 뚜껑을 열고 내용물을 반쯤 비운다. 이것은 물로 반쯤 채워져 있고 축과 일렬로 원반 위에 놓여진 물통이라 생각될 수 있다. 물통이 빠르게 회전할수록 물은 더욱 더 벽에 압착되어 위로 올라가게 된다(그림1.12). 이 현상의 이유는 물로 꽉 채워진 회전 상자에서와 마찬가지로 원심력 때문이다. 자유표면에서의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다. 물의 표면은 항상 물에 작용하는 힘과 직각을 이루며, 그렇지 않다면 힘의 접선 방향 성분이 영이 될 때까지 이 방향으로 움직이게 된다. 정지해 있는 물에서는 오직 중력만이 작용한다. 따라서 물의 자유표면은 지표면과 평행하다. 회전유체에서는 중력에 원심력이 더해져서, 두 힘의 합력이 포물면의 형태를 갖는 새로운 자유표면을 결정한다(그림1.12). 한 수평 단면에서의 압력은 자유표면의 높이에 비례하는데, 이는 다시 고체회전과 같은 잘 알려진 포물형 압력 분포를 갖는다. 비슷한 방법으로 자유 보텍스의 자유 수표면도 그림1.10과 같이 굽어진다.

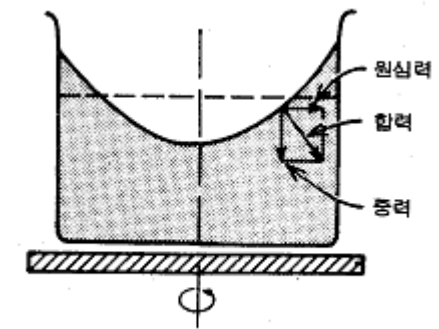


그림1.12 회전하는 물통속에 담긴 물의 분포

### 1.3 흡입(吸入) 보텍스와 방출(放出) 보텍스

정상(定常) 원형 운동의 두 기본형에 추가하여 반경 방향 성분과 축 방향 성분 뿐 아니라 접선 방향의 속도 성분을 갖으며 시간에 독립적인 또 다른 회전 운동이 있으며 나선형 보텍스가 한 예이다. 용기내의 물을 휘젓고 밑바닥 중앙에 있는 출구로 흘러 나가게 하면 자유 표면을 갖는 보텍스가 형성되는데, 그 모양은 여러 매개변수들 중에 회전의 세기와 침수깊이 즉, 바닥으로부터 물기둥의 높이에 따라 좌우된다. 회전수가 작거나 침수 깊이가 크면 수표면은 단지 보조개 형상을 할 뿐이다(그림1.13a). 더 강한 회전이나 더 작은 침수 깊이에 대해서 보조개 모양은 그림1.13b와 같은

공기의 와핵(渦核)으로 발전한다. 이 공기 핵이 용기의 바닥까지 신장되면 “임계 침수” 상태가 된다. 이 때부터는 공기가 방출류속에 포함된다(그림1.13c).

이러한 “공기포함보텍스(air-entrained vortex)”는 수리학에서 중요한 역할을 한다. 강이나 저수지의 물은 홍수 조절용 배수로, 관개, 가내공업과 산업 용수 그리고 발전을 위해 여러 가지 형태의 흡입관을 통해 공급된다. 물 흡입구는 경제적인 이유 및 침전물을 끌어 오지 않기 위하여 대개 수표면 가까이에 위치하므로 강력한 “공기포함보텍스”를 형성한다. 몇 가지 예를 들면, 이 흡입은 취수량을 현저히 감소시켜 댐의 범람을 초래하며 펌프의 효율을 떨어뜨리고 전동과 소음을 발생시킨다. 핵 반응로 내에서 공기 흡입을 통한 냉각 기능의 실패의 가능성은 더욱 심각한 문제이다.

수평형이든 수직형이든 이러한 목적을 위하여 관 입구에는 종구(鐘口, bellmouth) 형상이 있을 수 있다(그림1.14). 다른 조건이 같다면 종구는 취수량을 증가시킨다.

흡입되고 있는 물이 관을 통하지 않고 용기의 바닥(그림1.13c)에 있는 구멍을 통과할 때, 발달하는 선회 분출류는 흡입 공기와 함께 오리피스 가까이에서 그림1.15과 같은 형상을 나타낸다. 소용돌이가 크면 분출류는 더 아래 쪽에서 액적형태로 흩어지고, 작으면 다시 모여서 환상(環狀)흐름을 형성한다.

그림1.14b에서의 비슷한 모양의 쌍둥이 보텍스는 평판에 있는 구멍으로부터 나온 분출류가 평판에 평행하게 흐르는 흐름에 의해 급혀질 때 발생한다.

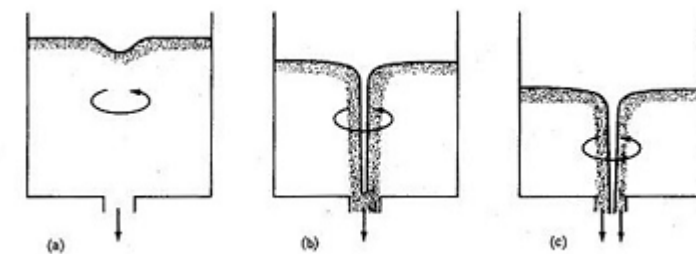


그림1.13 욕조바닥 액체방출 (a) 미약한 보텍스로 인한 덤플발생,

(b) 공기와핵이 바닥 도달(임계침수깊이)

(c) 강한 공기유입보텍스

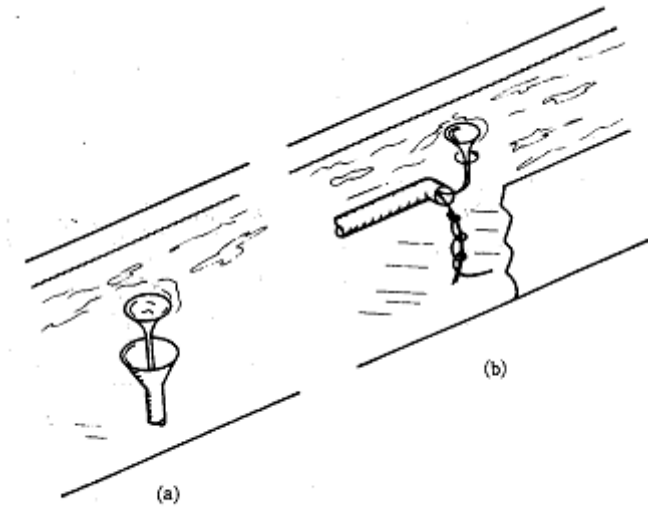


그림1.14 (a) 종구(鐘口) 형태의 연직(鉛直) 관입구에서의 보텍스  
(b) 수평 관입구에서의 보텍스

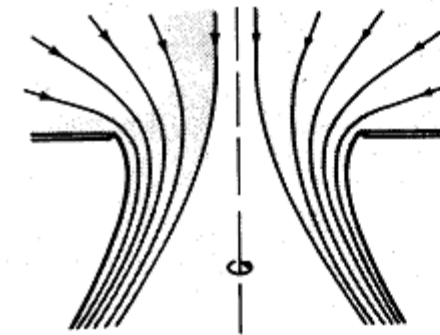


그림1.15 그림1.13(c)의 출구,  
同軸제트에  
유입공기의 선회분출류  
집중보텍스

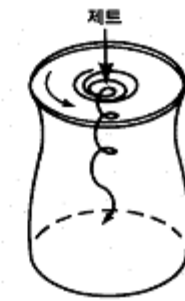


그림1.16 회전유체에서  
의한

관의 흡입구에서와 같은 강력한 보텍스의 형성은 각(角)운동량 보존의 법칙으로 설명될 수 있다. 간단하게, 배수구에서 약 30cm 떨어져 있고 미미한 각속도를 갖는 하나의 유체 입자를 가정한다. 이 입자가 흡입구로 빨려 들어감에 따라 각운동량을 보존시키기 위하여 흡입구로부터의 거리에 반비례하여 접선 속도가 증가해야 한다. 회전 중심으로부터 0.3cm 거리에서 그 입자는 속도가 100배 증가한다. 각속도는 거리의 제곱에 따라 감소하므로 0.3cm 거리에 해당하는 각속도는 10,000배 증가한다. 이것은 또한 다음과 같이 표현될 수 있다. 매초당 회전수는 30cm에서보다 0.3cm의 거리에서 10,000배 더 크다. 개략적이지만 간단한 이 계산은 유체 내에서 작은 초기 회전이 집중된 보텍스를 생성하기에 충분하다는 것을 보여준다.

또 다른 나선형 보텍스의 발생실험을 소개한다. 컵에 담겨 있는 뜨거운 커피를 젓고 나중에 차가운 우유를 중심에 쏟아 부으면, 커피는 상대적으로 큰 속도로 우유 제트 주위를 돌기 시작한다. 제트가 없다면 유체는 거의 고체처럼 회전한다. 제트 때문에 유체 입자는 중심 쪽으로 그리고 아래 쪽으로 끌려 들어간다. 유체 입자들은 각운동량을 보존하기 위해 더 빠르게 돌아야만 한다(그림1.16). 따라서 집중된 보텍스가 발달한다. 우유를 붓기 전에 커피를 젓지 않았다면 즉, 유체가 회전하지 않았다면 우유의 첨가는 보텍스를 발생시키지 못했을 것이다. 차가운 우유는 더운 커피보다 더 무거우므로 우유 제트의 하강 운동은 밀도 차이가 없을 경우보다 더 오래 지속된다.

고체 표면으로부터 관입구로 뺀 보텍스신장의 발생을 설명하여 보면 다음과 같다. 이를 위해서는 송풍기와 진공 청소기, 그리고 탁자가 필요하다. 공기가 방해받지 않고 진공 청소기의 관으로 빨려 들어갈 때, 관 입구에서는 축대칭의 “sink flow”가 생성된다 (그림1.17a). 관 가까이에 탁자면이 있으면 이 대칭성은 파괴되고, 그림1.17a에서 대칭축이던 점선은 그림1.17b에서 탁자 쪽으로 굽어진다. 탁자를 치우고 송풍기의 공기류를 대칭축과 어떤 각도를 갖게 하면 대칭축을 회전축으로 하는 흡입 보텍스가 생성된다(그림1.17c). 탁자를 다시 관 가까이에 가져 오면 회전축은 그림1.17b에 나타난 것처럼 탁자 쪽으로 굽어진다. 만들어진 보텍스는 탁자위에 얇은 물그릇을 가져다 놓으면 가시화될 수 있다. 보텍스의 축에서 낮아진 압력은 물의 자유표면을 궁형(弓形)으로 휘게하며, 상승하는 공기는 물방울을 끌어 당겨 작은 용오름을 만든다(그림1.17d).

이 효과는 엔진을 가동시킨 채 비행장에서 있는 제트 비행기 가까이에서 관찰된다. 제트는 고속으로 회전하게 된 공기를 빨아 들인다. 와선탄유가 생성될 수 있는데, 이것은 제트 엔진의 앞 끝에서 땅까지 뺀어 있다. 이것은 주변의 모래와 돌을 빨아들일 만큼 강력하며 엔진에 손상을 초래할 수 있다.

흡입 보텍스와 방출보텍스는 기하학적으로 비대칭인 주변 환경에서도 발견 된다. 예를 들어 보텍스는 수평한 바닥에 놓인 직사각형 흡입구나(그림1.18a), 경사지게 놓인 둥근 방출관(그림1.18b) 가까이에서도 발달할 수 있다. 물론 회전은 어느 방향으로도 가능하다.

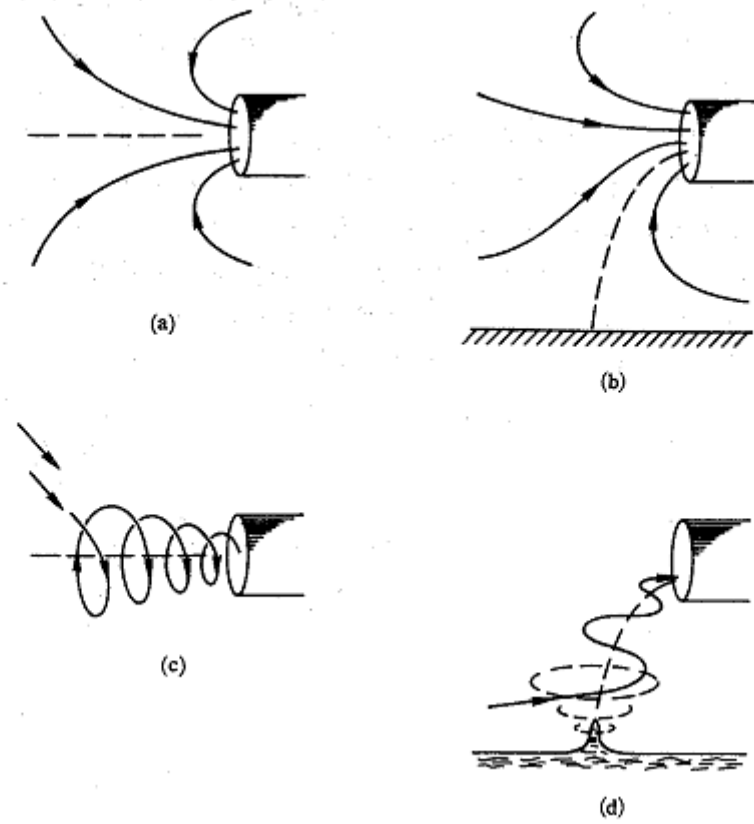


그림1.17 흡입보텍스의 생성에 대한 실험

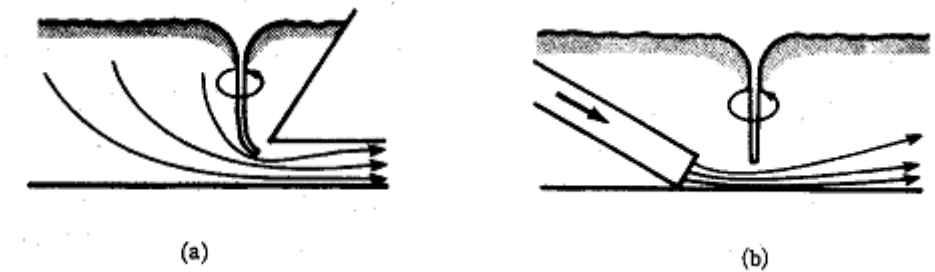


그림1.18 (a) 수평 직사각형 흡입구에서 생긴 흡입보텍스  
(b) 수조 바닥에 위치한 관출구에서의 방출보텍스

방출 보텍스는 욕조에서 그리고 여러 종류의 물탱크의 출구에서도 관찰된다. 사전에 아무도 물을 젖지 않았는데도 마개를 뽑은 뒤에 보텍스가 발생하는 이유는 다음과 같다. 어떠한 보텍스도 회전 에너지 없이 생성될 수 없으므로 보텍스가 발달하기 위해서는 얼마만큼의 각운동량이 이미 존재해 있어야 한다. 이와 연관된 "organization time"이라고 하는 것이 보텍스의 발달에 중요한 역할을 한다. 초기의 각운동량은 욕조 벽의 경계층 유동의 작은 비대칭이나, 마개를 비대칭으로 뽑는 행위, 혹은 비대칭 온도 분포나 심지어 수면 위의 비대칭 공기 운동에 의해서도 생성될 수 있다. 형성되는

보텍스의 회전 방향은 초기 각운동량에 달려 있다.

수 년 동안 지구의 회전이 과연 육조의 보텍스를 발생시킬 수 있는가 하는 의문에 관하여 논란이 있었다. 수평으로 움직이는 물체는 지구 회전에 의해 북반구에서는 오른쪽으로, 남반구에서는 왼쪽으로 굽힘을 받는다. 따라서 지구 회전이 육조보텍스의 필수 요인이라면 북반구에서는 반시계 방향으로 남반구에서는 시계 방향으로 보텍스가 회전해야 하며, 적도에서는 전혀 회전하지 않아야 한다. 그러나 관찰에 의하면 회전의 방향은 결정되어 있지 않다. 따라서 이러한 교란을 생각함에 있어서 지구의 회전은 무시될 수 있다. 하지만 이것이 지구 회전이 육조 보텍스에 전혀 영향을 미치지 않는다는 것이 아니다. 잘 제어된 실험조건하에서는 지구의 회전이 육조 보텍스의 방향을 결정한다. 이 효과는 1908년에 오스트리아의 물리학자 Turmlitz에 의해서 설명되었다. 그는 이 실험을 지구 자전의 증거라고 불렀으며, 1960년대에 보스턴의 Shapiro에 의해서 주의 깊은 실험이 수행되었고, 호주의 시드니 대학교에서도 같은 실험이 반복되었다. 그 결과, 보스턴에서는 육조 보텍스가 반시계 방향으로 돌고, 시드니에서는 시계 방향으로 회전하여 지구자전의 효과가 입증되었다.

## 2. 보텍스 발생 메커니즘

펌프장 섬프에서 발생하는 보텍스는 한쪽의 와단(渦端)이 고체벽(수중보텍스)이나 자유표면(자유표면보텍스)과 같은 경계상에 존재하고, 다른 끝이 흡입구(벨마우스 등)로 유입하는 와관(渦管)을 형성하고 있다. 이때에 순환(circulation)이 큰 값을 갖는 강한 보텍스의 내부에서는 회전유속성분뿐만 아니라 축방향으로도 빠른 유속성분이 발생함으로써 유체회전에 의한 원심력이나 Coriolis 힘에 의하여 중심의 압력이 매우 낮아지게 된다. 그 결과, 와단이 자유표면에 존재하면 수면의 덩플(dimple, 오목 파인 부분)이 흡입구까지 도달하여 공기흡입보텍스, 즉 자유표면보텍스(free surface vortex)가 만들어 지고 와단이 고체벽면상에 있으면 회전축에 따라서 cavitation이 발생하는 수중보텍스(submerged vortex)가 된다.

섬프에서 발생하는 수중보텍스나 공기흡입보텍스가 지속적으로 존재하기 위하여는 흡입흐름에 의하여 와단으로부터 와관으로 와도(vorticity)가 공급되어야 한다. 와도는 유체의 점성에 의하여 벽면에 따라서 형성되는 경계층뿐만 아니라 공기보텍스의 마찰에 의하여 자유표면에 따라서 형성되는 속도전단층에도 분포하며, 이와 같은 와도의 층이 와단으로부터 와관으로 흡입됨으로서 지속적인 공급이 이루어지는 것으로 판단된다.

섬프에서의 모형시험 상사칙은 단지, Froude수나 Reynolds수의 문제뿐만이 아니고 벽면에서의 경계층의 상사성, 자유표면에 따라 존재하는 속도전단층의 상사성 등의 문제도 동시에 검토되어야 한다. CFD의 활용에 따라서 상사성의 문제는 회피될 수 있으나 대신, 벽면경계층이나 자유표면상의 속도전단층에 대한 해상도 높은 해석이 요구되며, 특히, 와단부근에서의 비정상 난류경계층에 대한 정도 높은 해석이 필요하다.

