유체의 이상과 현실 체험

류신호
(경기도 용인시 성지고등학교 교사)

Ⅰ. 시작하는 글

과학에서 크게 다루어지고 있지 않으나 생활과 과학에서 다양한 연관과 응용이 있는 것이 유체와 그 현상입니다. 공기와 물에서 사는 사람들의 삶, 우리 몸의 일부를 이루고 있는 유체, 기상, 해양, 생명현상 등이 그렇습니다. 심지어 열과 전기, 기계 등과도 연관이 되어 있습니다.

여기에서 우리는 과학의 여러 분야에서 알아두면 쓸모 있는 유체역학의 기본 내용과 현실에서 적용을 생각해 보고자 합니다. 유체, 압력과 밀도, 부력, 파스칼의 원리, 연속방정식, 베르누이 방정식, 점성, 모세관현상, 마그누스 원리, 열과 파동의 관계 등도 생각해 보려 합니다.

유체의 이상과 현실의 이해를 위한 체험으로 빨대를 활용한 스프레이 제작과 몇 가지 실험, 생체 모방 공학을 이용한 단풍씨 제작, 마그누스의 힘 실험 등과 시연들이 있어 활동과 함께 유체의 이해를 넓일 수 있도록 수행해 보겠습니다.

원고에는 문헌에서 수식을 옮겨 넣었으나 많이 다루지는 않을 것이며 쉽게 이해할 수 있도록 안내할 것입니다.

Ⅱ. 유체에 대하여

1. 정지된 유체

가. 물질의 상태 : 고체, 액체, 기체

나. 연속체로서의 유체

유체는 고체와 달리 체적 팽창(분자 운동)이 자유롭기 때문에 특정한 공간(검사 체적)에서 움직이는 유체의 상태를 어떻게 규정 할 것인가 하는 문제가 있다.

밀도의 일반적 정의는 ‘질량 / 부피(주어진공간)’이다. 그러나 엄밀하게는 유체의 경우 주어진 공간의 크기에 따라 유체의 질량이 수

시로 변할 수 있다. 따라서 극한체적을 사용함으로써 이 문제를 해결할 수 있다.

$$\rho = \lim_{\delta V \to \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V}$$

ρ : 밀도
δV : 체적
δm : 질량
δV^* : 극한체적

극한체적은 보통 $10^{-9}\,\mathrm{mm}^3$, 표준상태 공기 분자 3×10^7 개를 사용한다. 연속체란 유체의 성질과 유체의 유동에 의해 일어나는 현상은 분자 운동에 의해 영향을 받지만, 분자 구조의 영향을 고려하지 않고 다수 분자의 평균으로 취급하는 것이다. 분자들이 충돌할 때까지 진행한 평균거리인 평균 자유 행정을 취급하는 것이 그 예이다.

다. 유체의 열역학적 성질

압력, 밀도, 온도, 내부 에너지, 엔탈피, 엔트로피, 정적 비열, 정압 비열, 점성계수, 열전도율 등은 유체의 열학학적 성질과 관련이 있다.

표 1. 밀도의 크기

물질 또는 물체	밀도(kg/m³)	물질 또는 물체	밀도(kg/m³)
성간 공간	10^{-20}	철	7.9×10^3
실험실에서의 최대 진공	10^{-17}	수은	13.6×10^3
공기 : 20℃ 1 atm	1.21	지구 : 평균	5.5×10^3
20℃ 50 atm	60.5	핵	9.5×10^3
스티로폼	1×10^2	지각	2.8×10^3
얼음	0.917×10^3	태양 : 평균	1.4×10^3
물 : 20℃ 1 atm	0.998×10^3	핵	1.6×10^5
20℃ 50 atm	1.000×10^3	백색왜성 (중심부)	10^{10}
바닷물 : 20℃ 1 atm	1.024×10^3	우라늄핵	3×10^{17}
혈액	1.060×10^3	중성자별 (중심부)	10^{18}

비중(specific gravity)은 물질의 밀도와 4.0℃에 $1000\,\mathrm{kg/m^3}$인 물의 밀도와의 비로 차원이 없다.

라. 압력

유체(액체 또는 기체)가 정지해 있을 때, 유체는 용기의 벽 또는 유체에 잠긴 물체의 면에 수직으로 힘을 가한다. 이 힘이 바로 압력이다. 보통 압력은

$$p = \frac{dF_\perp}{dA} \quad \text{(압력의 정의)} \tag{1}$$

이다. 압력의 SI 단위는 파스칼(Pa)이다. 1 파스칼 $= 1\,\mathrm{Pa} = 1\,\mathrm{N/m^2}$ 이고 기상학에서 주로 사용하는 두 가지 단위는 $10^5\,\mathrm{Pa}$에 해당하는

바(bar)와 밀리바(milibar)가 있다. 대기압 p_a은 우리가 살고 잇는 지구의 대기가 바다면에 작용하는 압력이다. 대기압은 기상변화와 고도에 따라서 변한다. 해수면에서의 표준대기압(평균값)은 1기압(atm)이다.

마. 압력, 깊이 및 파스칼의 법칙

1653년에 프랑스 과학자 파스칼(Blaise Pascal, 1623-1662)은 밀폐된 유체에 작용하는 압력은 용기 벽과 유체의 모든 부분에 같게 전달되는 사실과 깊이에 따라 압력이 똑같이 증가된다는 사실을 발견하여 이를 파스칼의 법칙이라 한다.

$$p = p_0 + \rho g h \ (\text{밀도가 균일한 유체의 압력}) \qquad (2)$$

이 식에서 보통 p는 절대압력, $\rho g h$는 계기압력이라 부른다.

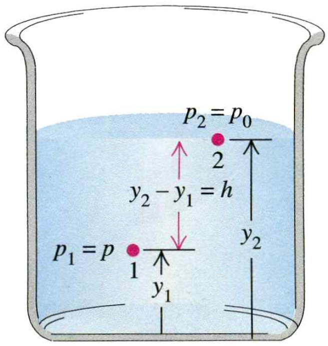


그림 1 액체 내 깊이 h인 지점의 압력은 표면압력 p_0보다 $\rho g h$만큼 더 크다.

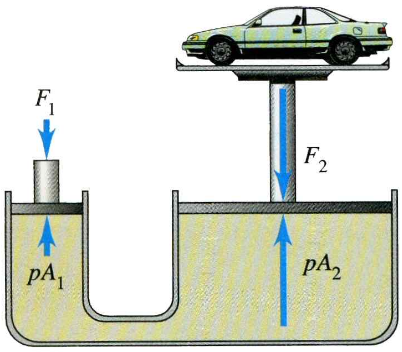


그림 2 파스칼의 법칙의 응용 예. 유체 컨테이너의 크기는 과장되게 표현되었다.

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \ \text{그리고} \ F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \qquad (3)$$

그림 2과 식 (2)에서 보이듯이 유압 기중기는 두 피스톤의 면적과 같은 곱하기 인자를 가지는 힘 배가 장치이다. 치과용 의자, 유압기중기와 잭, 엘리베이터 그리고 유압브레이크 등은 이 원리를 사용한다.

바. 부력

유체에 떠 있거나 잠겨있는 물체의 경우, 유체가 물체에 작용하는 총 위쪽 방향의 힘은 밀어낸 유체의 무게 mg와 크기가 같다. 고체에 작용하는 이 위쪽 방향의 힘을 부력(Buoyant force)이라 부른다. 부력의 작용선은 일어낸 유체의 무게중심을 통과한다(물체의 무게중심과 반드시 일치할 필요는 없음).

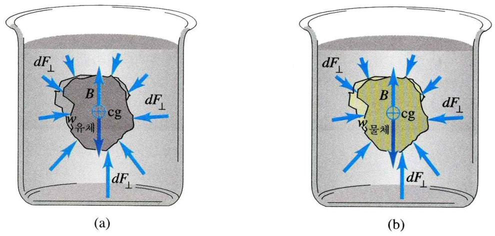


그림 3 (a) 자신의 무게와 주위 유체로부터 부력을 받는 평형 상태에서의 유체소. (b) 유체소를 같은 모양의 물체로 대치했을 때, 부력은 밀어낸 유체의 무게와 같다. 이 때 유체를 대체한 물체의 무게와 상관없이 부력은 같다.

사. 표면장력

다음과 같은 관찰은 무엇을 뜻하는가? 밀도가 물도다 몇 배나 큰 종이 클립이 물 표면에 정지한 채 떠 있다. 어떤 곤충은 수면에서 걸을 수 있다. 곤충의 발은 표면을 움푹 들어가게 하지만 표면을 관통하지 않는다. 이러한 현상은 액체의 표면이 장력을 받고 있는 얇은 막처럼 작용하는 표면 장력(surface tension)의 좋은 예이다. 액체 속의 분자들은 서로에게 인력을 작용한다.

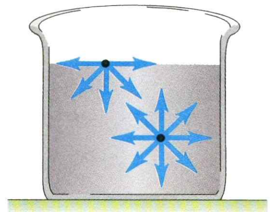


그림 4 액체의 분자는 주위의 분자와 인력을 작용하여 가까이 하려 한다. 표면 위의 분자는 아래쪽으로 끌리는 힘을 받는다. 그로 인해 액체 표면이 작아지게 된다.

아. 모세관

그림 5에서와 같이 기체-액체 경계면이 고체 표면과 만날 때, 기체-액체 경계면은 보통 고체 표면 근처에서 위 또는 아래로 구부러진다. 이 면이 표면과 만나서 이루는 각 θ를 접촉각(contact angle)이라고 부른다. 물과 유리와 같이 액체 분자와 고체분자 사이에 끌리는 힘이 액체 분자들 사이에 끌리는 힘보다 크면 액체는 고체 표면에 달라붙거나 적시게 된다. 이 경우 기체-액체 계면 곡선은 위로 구부러지고, θ는 $90°$ 보다 작다. 반대로 수은과유리에서는 수은 분자들 사이의 인력이 커서 액체는 적시지 않으며, 기체-액체 계면 곡선은 아래로 구부러지고 θ는 $90°$ 보다 크다.

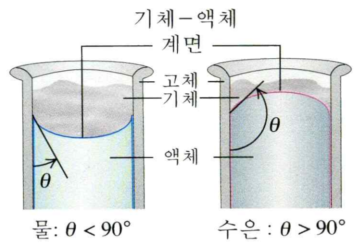


그림 5 기체-액체 계면이 고체 표면과 접촉했을 때, 계면은 보통 고체 표면 근처에서 위 또는 아래로 구부러진다.

표면 장력은 좁은 관에서 액체를 밀어 올리거나 밀어 내린다. 이런 효과를 모세관(capillarity) 현상이라고 부른다.

모세관 현상은 종이나 수건에 의한 물의 흡수, 양초 심지에서 녹은 촛농의 상승 그리고 다른 일상적인 현상의 원인이다. 우리의 몸에서 혈액은 동맥과 정맥을 통해서 주입되는데, 모세관 현상은 실핏줄에서

중요한 역할을 한다.

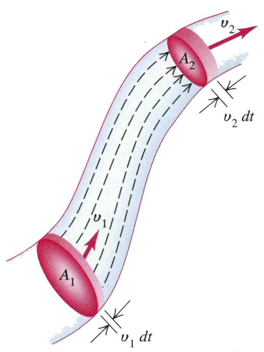
표면장력과 관련된 음(-) 압력이란 현상이 있다. 액체 내부에서 변형력은 보통 압축성이지만, 어떤 상황에서는 액체가 장력 변형력을 유지할 수 있다. 한쪽 끝이 막혀있고 다른 쪽 끝은 피스톤이 꽉 밀착되어 있는 실린더를 생각해 보자. 관의 내부 면과 피스톤 표면을 완전하게 적시도록 액체로 관을 완전히 채운다. 그러면 액체 분자들은 ㅇ 모든 표면에 부착된다. 만약 표면이 매우 깨끗하고 액체가 매우 순수하다면, 피스톤 표면을 끌어올렸을 때 장력 변형력과 약간의 부피 증가를 관찰할 수 있다. 즉, 액체를 잡아 늘리게 된다. 이 때, 부착력이 용기 벽에서 액체가 떨어져 나가는 것을 막아준다.

물의 경우, 300기압 정도의 장력 변형력을 실험실에서 관찰할 수 있다. 이런 상황은 매우 불안정하여 장력을 받는 액체는 여러 개의 작은 물방울로 쪼개지는 경향이 있다. 그러나 키가 큰 나무에서 음(-)의 압력은 일반적인 현상이다. 나무 생장층 내에서 지름 0.1 mm 정도인 작은 물방울을 통해서 뿌리로부터 잎으로 영양분을 운송하는 중요한 과정은 바로 음(-)의 압력 현상이다.

2. 흐르는 유체

가. 유체의 흐름과 연속 방정식

액체에서처럼 기체에서도 한 지점과 다른 지점의 압력차가 그리 크지 않는 경우에는 비압축성으로 다룰 수 있다. 유체가 관 내부를 흐르거나 또는 장애물 주위를 흐를 때처럼, 유체의 두 층이 서로 상대적으로 움직일 때 유체내의 내부 마찰은 층밀리기변형력을 일으킨다. 어떤 경우에는 이 층밀리기 힘은 중력이나 압력차에 의해서 야기되는 힘에 비해서 무시될 수 있다.



단면적이 변하는 흐름관. 유체가 비압축성이라면 곱 Av 값은 관의 모든 지점에서 일정하다.

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt\text{, 또는}$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \text{ (비압축성 유체의 연속 방정식)}$$

이다. 곱 Av는 관의 단면을 통과하는 부피 흐름률 dV/dt이다.

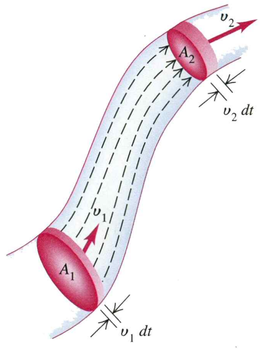
$$\frac{dV}{dt} = Av \quad \text{(부피 흐름률)}$$

임의의 단면적을 통해서 단위 시간당 질량 흐름인 질량 흐름률 dm/dt는 밀도 ρ 곱하기 부피 흐름률 dV/dt와 같다.

질문 : 관의 단면적을 20분의 1로 줄이면 유체의 속력은 몇 배로 될까요? ________

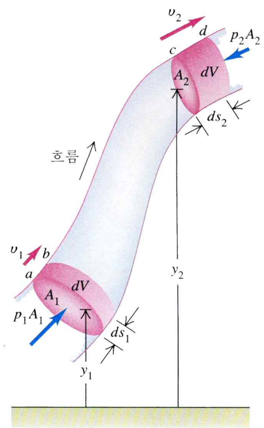
나. 베르누이 방정식

이상유체의 흐름에 관한 압력, 유속 그리고 높이와 관련된 베르누이 방정식이라 부르는 중요한 관계식을 유도해 보자. 베르누이 방정식은 펌프 작동의 원리, 수력 발전, 비행기의 비행 원리를 이해하는 기본 원리이다.



단면적이 변하는 흐름관. 유체가 비압축성이라면 곱 Av 값은 관의 모든 지점에서 일정하다.

압력의 속도 의존성은 연속 방정식에서 알 수 있다. 비압축성 유체가 단면적이 변하는 흐름관을 따라서 흐를 때 유체 속력은 변해야 하므로 각 유체소는 가속도를 가진다. 관이 수평일 때 이 가속도를 일으키는 힘은 주위 유체가 공급해야만 한다. 이것은 압력이 위치에 따라서 달라야만 한다는 것을 의미한다. 만약 압력이 모든 위치에서 같다면 모든 유체소에 작용하는 알짜힘은 0이어야 한다. 흐름관의 단면이 좁아져서 유체소의 속력이 커질 때, 유체소가 가속되는 방향으로 알짜힘을 가지기 위해서 압력이 큰 영역으로부터 작은 영역으로 유체소가 움직여야 한다. 고도가 변하면 추가적으로 압력차를 일으킨다.



압력이 한 알짜일은 운동에너지 변화의 합과 같다.

베르누이 방정식을 유도하기 위해서, 흐름관 단면 내의 유체에 일-에너지 정리를 적용한다. 그림에서 어떤 초기 시간에 두 단면 a와 c 사이에 놓여 있는 유체를 고려한다. 낮은 쪽 끝에서 유체의 속력이 v_1이고 압력은 p_1이다. 임의의 짧은 시간 간격 dt 동안 초기에 a에 있던 유체는 b까지 거리 $ds_1 = v_1 dt$를 움직인다. 같은 시간 간격동안 c에 있던 유체는 d까지 움직이며, 거리는 $ds_2 = v_2 dt$이다. 양 끝에서 단면적은 보는 바와 같이 A_1과 A_2이다. 연속 관계 때문에 dt 동안 두 단면을 통과하는 유체의 부피는 $dV = A_1 ds_1 = A_2 ds_2$이다.

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad \text{(베르누이 방정식)}$$

로 표현할 수도 있다. 첨자 1과 2는 흐름관을 따라서 있는 임의의 두 점을 나타내므로,

$$p + \rho g y + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{일정}$$

로 쓸 수도 있다. 유체가 흐르지 않는다면 즉, $v_1 = v_2 = 0$이면 식은 정지 상태에서 유체의 압력을 나타내는 식과 같아짐을 주목하자. 베르누이 방정식은 비압축성과 비점성인 유체에만 적용됨을 유의하자. 만일 흐름이 비회전(irrotational)일 경우에는 흐름선상에서 뿐만 아니라 모든 점에서 베르누이 방정식은 적용된다.

에너지보존법칙으로 생각해보는 베르누이 방정식

다. 변화구

변화구는 정말로 진로가 변하는가? 확실히 그렇다. 그림 6a는 왼쪽에서 오른쪽으로 공기 중에서 움직이는 공을 나타낸다. 공의 질량 중심과 함께 움직이는 관찰자에게 공기 흐름은 그림에서 유선으로 나타내었듯이 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이는 것처럼 보인다. 보통 이것과 연루되어 공의 속력이 크기 때문에 공 뒤에는 난류 영역이 생긴다. 공이 회전할 때(그림 6b), 공기의 점성이 공 표면 근처의 공기층을 회전 방향으로 감아 돌린다. 공의 표면에 대한 공기의 속력은 아래에

서 보다 공의 윗면에서 더 작게 된다.

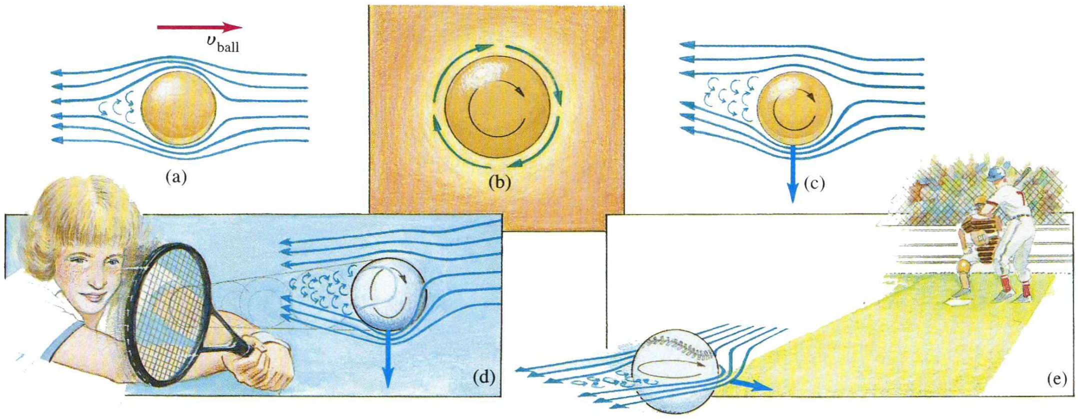


그림 6 볼에 대해서 상대적으로 오른쪽으로부터 왼쪽으로 움직이 는 공기의 운동은 정지한 공기 중에서 공이 왼쪽으로부터 오른쪽으로 움직이는 것에 해당한다. (a) 회전하지 않는 공 뒤에는 대칭적인 난류 영역이 있다. (b) 회전하는 공이 표면 근처의 공기층을 따라 돌게 한다. (c) 회전하는 공에서 공기 흐름의 편향과 난류 영역의 비대칭으로 나타나는 힘. 표시해 놓은 힘은 공기 흐름에 의해 공에 작용하는데, 이는 공 앞부분의 접선 속도 방향으로 공을 민다. 힘은 (c) 테니스 공을 아래로 밀거나 (d) 야구공의 커브를 만든다.

난류 영역은 비대칭이 되어 아랫면보다 윗면에서 더 앞 쪽으로 일어난다. 이런 비대칭이 압력차를 유발하여 공의 위쪽에서 평균 압력은 아래 바닥에서보다 더 크다. 대응하는 알짜 아래쪽 방향 힘은 그림 6c에서 보듯이 공을 휘게 한다. 이것이 테니스 코트에서 매우 빠른 서브를 유지하기 위하여 탑스핀이 사용되는 이유이다(그림 6d). 야구의 변화구를 나타내는 그림 6e에서 공은 거의 수직축에 대해서 회전하고, 그래서 실제 꺾임은 옆으로 일어난다. 그 경우에 이것을 위에서 본 것이 그림 7c이다. 오른손잡이가 던진 변화구는 오른손잡이 타자로부터 멀어져, 공을 때리기 더 어렵게 한다는 사실에 주목하라.

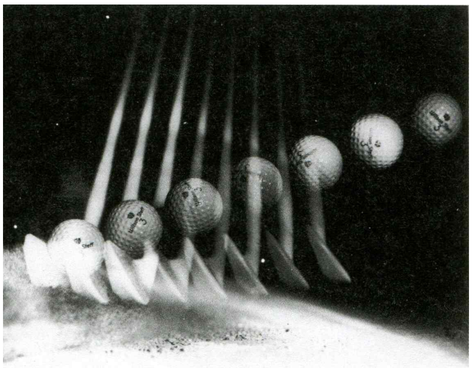


그림 7 골프채로 친 골프공의 연속 사진. 사진은 초당 1000번 찍어서 얻었다. 공은 여덟 그림에서 한 번 회전해서, 125 rev/s 또는 7500 rpm의 각속력을 가진다.

유사한 효과가 골프공에서도 일어나며, 골프채의 기울어진 옆면과의 충격으로 인해 항상 백스핀이 일어난다. 공의 위 쪽 면과 아래쪽 면 사이의 결과적인 압력차는 공의 회전이 없을 때보다 훨씬 더 오래 공중에 머물게 하는 양력을 일으킨다. 잘 친 드라이브는 체공 초기 부분에 티

(tee)로부터 뜨는 것처럼 보이게 하거나 심지어 위쪽으로 구부러지는 것처럼 보이게 한다. 이것은 환상이 아니라 실제 효과다. 공에 있는 패인 무늬는 중요한 역할을 한다. 공의 점성과 관련된 효과 때문에, 같은 초기 속도와 회전에 대해서 패인 무늬가 없는 공이 있는 공보다 훨씬 더 짧은 궤적을 가진다. 심지어 어떤 제작자는 패인 무늬의 모양이 중요하다고 주장한다. 다각형 무늬가 둥근 것보다 더 좋다고 주장한다. 그림 7은 골프채로 친 바로 직후의 골프공의 백스핀을 나타낸다.

라. 점성

점성은 유체의 내부 마찰이다. 점성력은 다른 부분에 대해 유체의 한 부분이 운동하는 것을 방해한다. 점성 때문에 잔잔한 물 위를 지나가기 위해서 카누의 노를 젓는 노력이 필요하기도 하지만, 노를 젓기 때문에 점성이 생기기도 한다. 점성은 관에서 유체의 흐름, 혈액의 흐름, 엔진의 윤활 등 실제적인 여러 면에서 중요한 역할을 한다.

점성 유체가 고체 표면과 접촉할 때는 항상 고체 표면에 달라붙는 경향이 있다. 표면 근처에는 유체의 얇은 경계층이 형성되는데 여기에서 유체는 표면에 대하여 거의 정지 상태가 된다. 이것이 빠르게 회전하는 선풍기 날개에 먼지 입자가 붙는 이유이고, 호스로 물을 뿜더라도 자동차의 모든 진흙을 제거 할 수 없는 이유이다.

점성 흐름의 가장 간단한 예는 두 평행판 사이에서 유체의 운동이다(그림 8). 아래쪽 판은 정지해 있으며, 위쪽 판은 속도 v로 움직인다. 각 면에 접촉한 유체는 그 표면과 같은 속도를 가진다. 그림 8에 화살표로 나타냈듯이, 유체 중간층의 유속은 한 면에서 다른 면까지 일정하게 증가한다. 이런 형태의 흐름을 층흐름이라 부른다(층은 얇은 판이다). 층흐름에서 유체의 층은 다른 층의 위를 매끄럽게 미끄러진다.

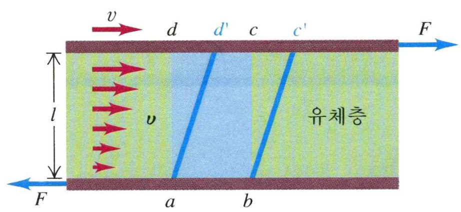


그림 8 점성 유체의 층흐름 점성은 층밀리기 변형력 F/A와 층밀리기 변형률 v/l의 비이다.

어떤 순간에 $abcd$ 모양을 가진 유체의 한 부분은 다음 순간에 $abc'd'$ 모양을 가지며, 운동이 계속될 때에 더욱 더 찌그러진다. 즉, 유체는 층밀리기 변형이 연속적으로 증가하는 상태로 있게 된다. 이 운동을 유지하기 위해서, 일정한 힘 F가 위쪽 판에서 오른쪽으로 작용

해야 하고, 정지 상태를 유지하기 위해서 아래쪽 판에 왼쪽으로 같은 크기의 힘이 작용해야 한다. A가 각 층의 표면적이라면, 비 F/A가 유체에 작용하는 층밀리기 변형력이다.

층밀리기 변형은 변위 dd'과 길이 l의 비로 정의한다. 고체에서 층밀리기 변형은 층밀리기 변형력에 비례한다. 유체에서는 변형력이 가해지는 한 제한없이 연속적으로 증가하는 층밀리기 변형이 있다. 변형력은 층밀리기 변형에 관계될 뿐만 아니라, 층밀리기 변형의 변화율에도 관계된다. 변형율이라 불리는 변형의 변화율은 dd'의 변화율(움직이는 면의 속도 v)을 l로 나눈 것과 같다. 즉

$$\text{층밀리기 변형의 변화율} = \text{변형률} = \frac{v}{l}$$

η(에타)로 나타내는 유체의 점성(viscosity)은 층밀리기 변형력 F/A와 변형률의 비로 정의한다.

$$\eta = \frac{\text{층밀리기 변형력}}{\text{변형률}} = \frac{F/A}{v/l}\,.$$

이 식을 다시 쓰면, 힘이 속도에 비례함을 알 수 있다.

$$F = \eta A \frac{v}{l}\,.$$

점성 η가 속력 v와 무관할 때, 이 유체를 뉴턴 유체라 부른다. 이 때 식에 의해 힘 F는 속력에 비례한다. 모든 유체에서 힘과 속도가 서로 정비례 관계를 나타내지는 않는다. 부유물과 분산물이 있는 유체는 점성면에서 볼 때는 뉴턴 유체가 아니다. 변형률이 증가할 때, 이 입자들은 변형되어 흐름을 쉽게 하고 결과적으로 η가 감소한다. 사람 관절을 부드럽게 해주는 유체도 비슷한 특성을 나타낸다.

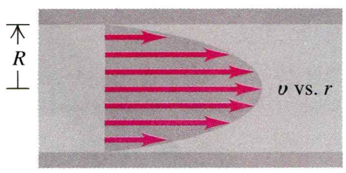


그림 9 실린더형 관에서 점성 유체의 속도 측면도

그림 9은 실린더형 관에서 점성 유체의 흐름에 대한 유속의 측면도를 나타낸다. 속력은 중심축을 따라 갈 때 가장 크고 관의 벽면에서 0이다. 그래서 가장 바깥관은 정지해 있고 중심관은 가장 빨리 움직이는 망원경과 같다. 실린더형 유체소에 식 (19)를 적용함으로써 속력 측면도를 설명하는 방정식을 유도할 수 있다. 반지름 R인 관의 중심축으로부터 거리 r인 곳에서 유속 v는

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L}(R^2 - r^2)$$

이다. 여기에서 p_1과 p_2는 길이 L인 관의 두 끝지점에서 압력이다. 어떤 점에서 속력은 압력 기울기라 불리는 단위 길이당 압력의 변화 $(p_2 - p_1)/L$ 또는 dp/dx에 비례한다(흐름 방향은 항상 dp/dx에 반대이다). 총 부피 흐름률을 구하기 위해서 안쪽의 반지름이 r, 바깥쪽의 반지름이 $r + dr$인 고리를 생각하자. 단면적의 면적소 $dA = 2\pi r\,dr$이다. 이 면적소를 지나는 부피 흐름률은 $v\,dA$이며 총 부피 흐름률은 이것을 $r = 0$에서 $r = R$까지 적분하여 얻는다. 그 결과는

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{8}\left(\frac{R^4}{\eta}\right)\left(\frac{p_1 - p_2}{L}\right) \quad \text{(포아즈이유의 방정식)}$$

이다.

이 관계식을 포아즈이유가 처음 유도했기 때문에 포아즈이유의 방정식 (Poiseuille’s equation)이라 부른다. 기대했던 것과 같이, 부피 흐름률은 점성에 반비례한다. 부피 흐름률은 또한 압력 기울기 $(p_1 - p_2)/L$에 비례하고, 반지름 R의 네제곱으로 변한다. R을 두 배로 하면, 흐름률은 16배 증가한다. 이 관계식은 배관 공사와 피하 주사 바늘 디자인에 중요하다. 바늘 크기는 바늘로부터 유동률을 결정할 때 엄지 손가락으로 미는 압력보다 훨씬 더 중요하다. 바늘 지름을 두 배로 하면 엄지 손가락에 미치는 힘을 16배 증가시키는 것과 같은 효과가 나타난다. 마찬가지로 동맥과 정맥에서의 혈액 흐름은 상대적으로 지름 변화가 작아도 제어할 수 있는 범위는 크며, 온혈 동물에서 중요한 온도 제어 메커니즘이다. 동맥 경화증때문에 동맥이 상대적으로 약간 좁아지면 혈압 상승이 일어날 수 있으며 심장 근육에 추가적인 변형이 생긴다.

점성 유체 흐름에서 더 유용한 한 가지 식은 점성이 η인 유체 내부를 속력 v로 움직이는 반지름 r인 구에 작용하는 힘 F에 대한 표현이다. 흐름이 층흐름일 때 관계식은 간단하다. 곧

$$F = 6\pi\eta r v \quad \text{(스토크스의 법칙)}$$

이 식을 스토크스의 법칙(Stokes’s law)이라 부른다.

질문 : 인간의 동맥경화를 점성으로 설명할 수 있을까?

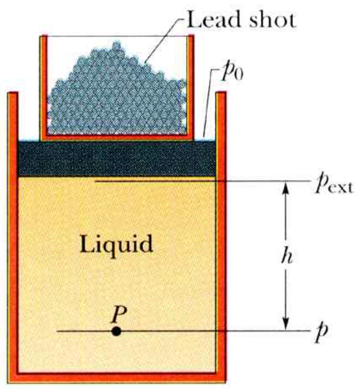
Ⅲ. 현실에서의 유체 응용

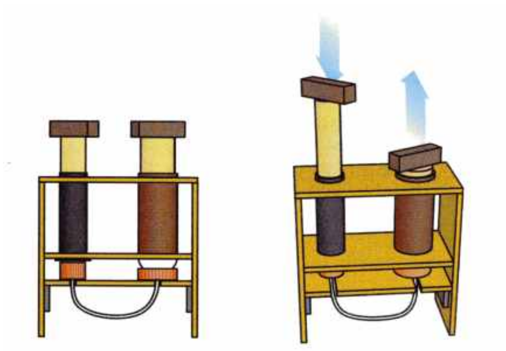
1. 파스칼의 원리와 응용

가. 파스칼의 원리

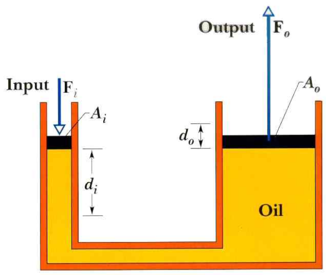
비압축성 유체에서 한 부분의 압력변화는 유체의 모든 부분과 그릇의 벽면으로 똑같이 전달된다. (1652 Blaise Pascal)

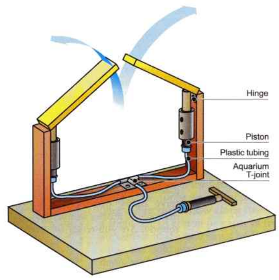
$$p = p_{ext} + \rho g h$$





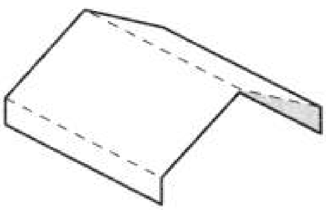
나. 응용 : 유압기 - $\Delta p = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_o}{A_o}$ 따라서 $F_o = F_i \frac{A_o}{A_i}$

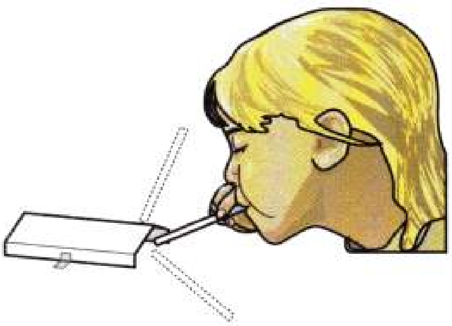




2. 베르누이의 정리의 몇 가지 적용 예

가. 접힌 종이 사이로 빨대를 이용하여 공기를 불어 넣어 보세요.





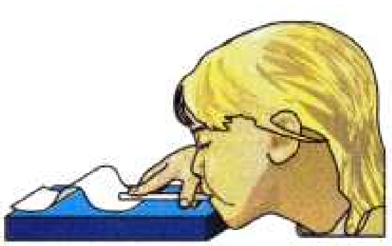
나. 풍선을 흐르는 유체(물, 공기)에 가까이 한 후 실을 당겨보자.

다. 유체가 움직일 때 장애물 주변에 작은 쓰레기는 어떻게 되는가?

라. 코안다 효과(Coanda effect)

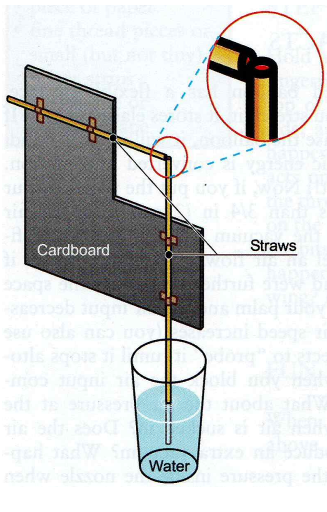
유체가 곡면을 따라 흐르려고 하는 현상을 말합니다. 즉, 유체가 곡면과 접촉하여 흐를 때, 직선으로 흐르는 대신 곡면의 곡률을 따라 흐르는 경향을 나타냅니다. 다음과 같이 해 보세요.

마. 그림과 같이 따라 해 보세요. 무엇을 관찰하였나요?



사. 자신만의 스프레이 만들기

그림과 같이 유속을 증가시킬 수 있도록 두 빨대를 만나게 하되, 공기가 불려나가는 쪽의 빨대가 반정도 막히게 설치하여 물의 상승과 스프레이의 작동 상태를 확인해 보자.



아. 진공청소기로 하는 이상한 실험

그림과 같이 강한 진공청소기 앞에 적절한 정도로 공기를 불어 넣은 풍선을 설치하자.

풍선이 빨려들어갔다가 다시 튀어나오는 것을 반복하는 것을 관찰할 수 있다.

왜일까?

자. 관성을 활용한 진공청소기

호스와 양파망으로 반들 수 있는 진공 청소기

차. 반음각을 이용하여 상승기류를 만들고 글라이딩을 하는 비행기

Walk along glider

3. 생활속의 유체

가. 새의 비행 방법 중 상승기류의 이용

나. 한옥의 신비(뒷쪽 산, 대청마루, 두 건물을 나란하지 않게 건축)

다. 볼텍스 튜브

라. 유체속의 소리, 생명

※ 참고문헌

가. Eduardo de Campos Valadares, Physics, Fun, and Beyond, Prentice Hall, 2006

나. http://theory.uwinnipeg.ca/mod_tech/node68.html

다. http://mulli2.kps.or.kr/~pht/12-4/030412.pdf

라. http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=hl2aew&logNo=96404727

마. http://www.sciencetoymaker.org/airSurfKit/

바. https://sites.google.com/site/controllableslopesoaring/howtofly