

유체의 성질과 운동

1. 공기와 물의 성질

가. 공기와 물의 차이점

공기와 물은 다같이 맛과 냄새와 색이 없으며, 인간의 생명을 유지하는데 없어서는 안되는 유체라는 점에서 매우 유?하다. 그러나 공기가 압력을 가하면 얼마든지 체적이 줄어 드는데 반하여 물은 비압축성 유체라고도 부른다. <그림 1>에서 공기는 조금만 압력을 가해도 곧바로 용기로부터 빠져나간다. 설령 뚜껑을 밀폐하여 압력을 가하면 작은 구멍을 통하여 급속히 분출하는데, 분출하면서 주위 공기와 섞여 버려 분출속도가 급속히 떨어진다. 그러나 반대로 물은 뚜껑 없이도 어떤 용기에나 담을 수 있으며 작은 구멍으로 분출시키려면 상당한 압력을 가하지 않으면 안된다. 그러나 일단 분출하기 시작하면 물은 넓게 퍼지지 않고 멀리까지 속도가 쉽게 떨어지지 않은 채 한 곳으로 나간다.



<그림 1> 공기와 물의 차이점

나. 공기와 물의 물리량

공기와 물의 물리적 성질은 <표 1>과 <표 2>에서 볼 수 있다. 물은 온도에 의해서 체적이 약간 변하는 반면 점성은 상당히 변화함을 나타낸다. <표

1>은 상용온도 범위 내에서의 물의 비중과 점성의 변화를 나타낸 것이다.

<표 1> 물의 성질(1기압시)

溫 度 °C	0	10	20	30	40
密 度 ρ (kg · sec ² /m ⁴)	101.96	101.94	101.79	101.53	101.18
粘性係數 μ (kg · sec/m ⁴)	182.9×10^{-4}	133.6	102.9	81.6	66.6

<표 2> 건조공기의 성질(1기압시)

溫 度 °C	0	10	20	30	40
密 度 ρ (kg · sec ² /m ⁴)	0.1319	0.1272	0.1228	0.1188	0.1150
粘性係數 μ (kg · sec/m ⁴)	1.743×10^{-4}	1.794	1.844	1.893	1.942

한편 공기는 압력에 의해서 성질이 상당히 변화하기 때문에 1기압(=760mm Hg) 하에서의 값으로 나타냈다. <표 1>과 <표 2>에서 온도를 올리면 점성을 나타내는 μ 가 물은 내려가고 공기는 올라감을 알 수 있다. 물의 점성은 주로 분자상호간의 응집력과 관계가 있는데 온도를 올리면 분자의 운동이 활발해져 응집력이 약해지기 때문이다. 반대로 공기의 경우는 분자의 응집력이 거의 없고 주로 점성은 분자가 사방팔방으로 돌아 다니는 운동에 의해 생긴다.

2. 공기와 물, 실의 운동

가. 공기의 운동

1) 베르누이의 정리(Bernoullis theorem)

공기는 물과 달라서 압력을 가하면 체적이 축소하기 때문에 수식도 매우 복잡하게 된다. 먼저 연속의 법칙에서 한쪽 단면에서 유입시킨 질량은 그대

로 다른 단면으로 나오기 때문에

$$A_1 V_1 \rho_1 = A_2 V_2 \rho_2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

여기서, A_1, A_2 : 파이프의 단면적

V_1, V_2 : 단면에 수직으로 측정한 평균유속

이 된다. 이 경우의 밀도, 즉 단위체적당의 중량 γ 는 온도 T 가 일정하면

$$\gamma = P/RT \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

로 되어 보일-샤를의 법칙(Boyle-Charles' law)이 성립된다. 이것을 등온변화라고 한다.

$$P/\sigma = \text{일정} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

여기서, R 은 기체정수로서

$$R=29.28\text{kg}\cdot\text{m/kg/}^\circ\text{C}$$

또한 파이프의 벽으로부터 열이 들어가거나 빠져나가지 않을 때는 단열변화로 볼리워

$$P/\gamma^k = \text{일정} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

가 된다. k 는 단열지수로서 공기의 경우는 $k=1.4$ 이다.

기체의 경우는 밀도가 낮기 때문에 (10)식과 같은 높은 차에 의한 압력변화는 무시한다. 따라서 베르누이의 정리에서 H 를 생략하고 단열변화로 하면

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma_1} \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$\text{또는} \quad = C_p(T_1 - T_2) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6)$$

이 된다. C_p 는 일정한 압력하에서 1g의 공기온도를 1 $^\circ\text{C}$ 올리는데 요하는 열량으로 $C_p=102.6\text{m/}^\circ\text{C}$ 이다.

2) 제트의 속도

노즐로부터 공기를 분출할 때의 속도는 (9)식에서 $V_1=0$ 으로 하여 구한다.

따라서 내부의 압력이 게이지압으로 0.9kg/cm^2 을 초과하면 출구에서는

$$\text{음속 } a = \sqrt{KP/\rho} = 340\text{m/sec} \cdots \cdots (7)$$

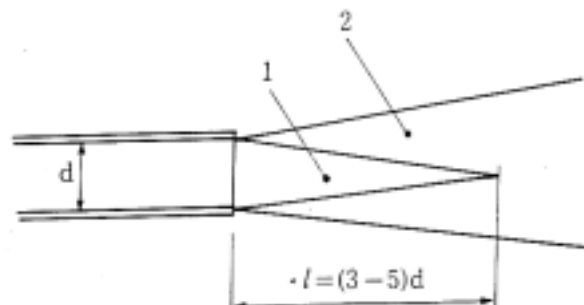
$$(P=760\text{mmHg}, T_1=T_2=15^\circ\text{C}, \rho=\frac{1}{8}\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4\text{일 때})$$

로 되어, 다음에는 이 이상으로 게이지압을 올려도, 분출하는 질량이 증가해도 유속은 음속 이상으로 되지 않는다.

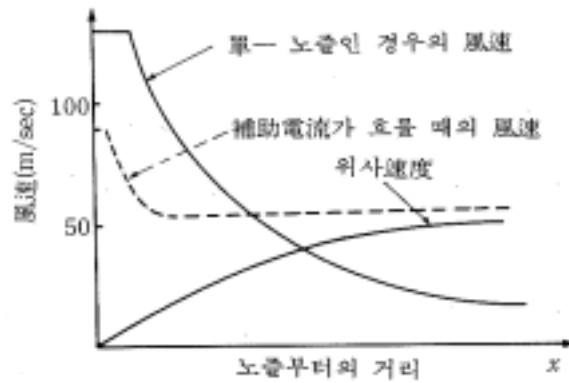
3) 관외의 공기속도

음속을 초월하지 않을 뿐 아니라 노즐을 빠져나오면 공기는 바로 팽창하여 주위의 공기와 혼합함으로써 유속이 저하한다. 노즐출구와 똑 같은 유속을 갖는 영역은 <그림 2>에서 볼 수 있는 것처럼 노즐 직경의 약 3~4배 거리까지로서, 이 부분을 포텐셜 코어(potential core)라 하고, 주위 2를

혼합영역이라고 부른다. 따라서 개구 전체로 보면 풍속은 <그림 3>에서 볼 수 있는 것처럼 노즐로부터 거리가 멀수록 급속히 쇠퇴하는데 반해 비주하는 실은 오히려 속도를 올려 풍속을 추월하는 것으로도 볼 수 있다. 그러나 이렇게는 실을 멀리까지 보내는 것이 불가능하기 때문에 대부분의 직기들이 개구를 따라서 여러 개의 부노즐(sub nozzle)을 설치하여 공기를 분출, 유속의 저하를 방지하고 있다.



<그림 2> 노즐 부근의 유속



<그림 3> 개구내의 속도분포

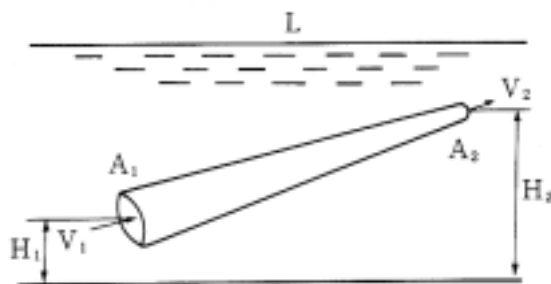
나. 물의 운동

1) 베르누이의 정리

물은 압력을 가해도 체적이 변하지 않기 때문에 <그림 4>와 같은 파이프에 유입된 물이 다른 쪽으로 유출할 때는 용적이 같으므로

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots(8)$$

라고 하는 관계가 성립한다(연속의 법칙).



<그림 4> 연속의 법칙

여기서, A_1 , A_2 는 파이프의 단면적, V_1 , V_2 는 단면에 수직으로 측정한 평균유속이다. 이 식을 사용하면 꼬불꼬불하여 굽기가 상이한 파이프내의 유속도

간단히 계산할 수 있다. 다음에 수면 L인 상태에서 흐르고 있는 물 가운데 흐름에 따라서 눈에는 보이지 않지만 A₁-A₂를 <그림 4>에서 생각해 보자. 어떤 기준이 되는 수평면으로부터의 높이를 H₁, H₂라고 하면 여기에는 수압 P₁, P₂가 걸리기 때문에 이 파이프가 운동의 조화를 이루기 위해서는

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + H_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + H_2 \cdot \cdot \cdot \cdot (9)$$

의 관계가 성립한다(베르누이의 정리).

여기서, g는 지구의 중력가속도=9.8m/sec², γ 은 유체의 단위체적당 중량으로 ρ g와 같다. 그리고 (9)식의 각 항은 압력헤드, 속도헤드, 위치헤드의 순서로 부른다.

2) 수압의 크기

수압의 크기는 (9)식을 사용하여 구할 수 있다. <그림 5>에서 정지해 있는 물에 대하여 점선으로 표시한 부분을 파이프로 가정해 보자. 단면 1, 2에서 모두 물이 정지해 있기 때문에 V₁=V₂=0이 된다. 수평면의 기준을 단면 1, 2에 응용하면 물의 γ 은 어느 위치에서나 같기 때문에

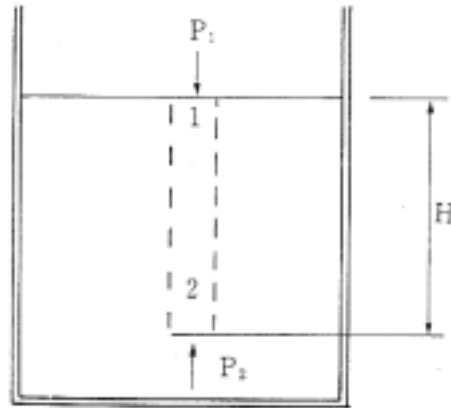
$$\frac{P_1}{\gamma} + H = \frac{P_2}{\gamma}$$

$$\text{따라서 } P_2 - P_1 = H\gamma$$

대기압 P₁은 어느 위치에서나 작용하기 때문에 일반적으로 1기압을 기준으로 하고 이 이상으로 작용하는 압력을 게이지압으로 나타낸다. 따라서 단면 2에서의 게이지압은 P₂=0이므로

$$\text{수압} = H \rho g \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (10)$$

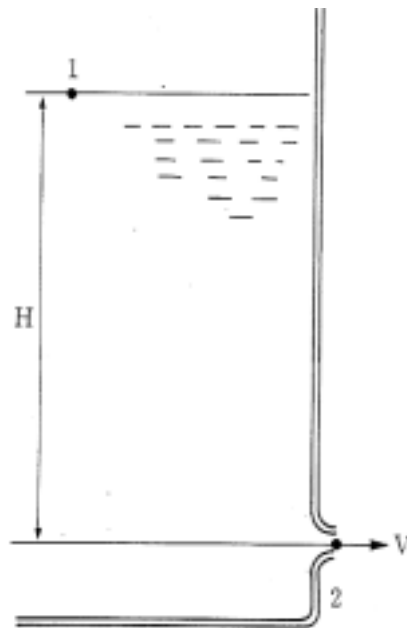
즉, 깊이에 비례하여 압력이 증가한다. 수면으로부터 10m 잠기면 약 1기압의 수압이 증가한다.



<그림 5> 수압의 계산

3) 제트의 속도

물의 분출속도도 베르누이의 정리를 이용하여 구할 수 있다. <그림 6> 과 같이 탱크의 수면으로부터 H 깊이만큼 위치한 곳에 설치한 노즐에서 분출하는 제트속도를 V 라고 하고, 수면 1과 노즐 출구 2에 대해 (9)식을 적용하여 계산한다.



<그림 6> Jet의 속도

탱크가 크기 때문에 수면이 내려가는 것을 무시할 수 있으므로 $V_1=0$ 이다.

또한 제트내의 대기압 P_1 과 같기 때문에

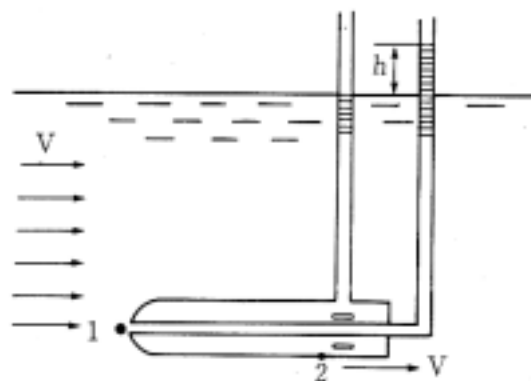
$$\frac{P_1}{\gamma} + H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2}{2g}$$

$$V = \sqrt{2gH} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (11)$$

이 된다. 탱크의 10m 깊이의 위치에서 분출하는 수속은 $V=14\text{m/sec}$ 이다.

4) 속도의 측정방법

물의 속도도 베르누이의 정리를 이용하여 측정할 수 있다. 물이 흐르는 방향과 평행하게 구멍이 열려 있는 관과 물의 흐름에 구멍이 있는 관을 조합시킨 <그림 7>과 같은 피토오관에서 장소 1과 2에 대해 (9)식을 적용시킨다.



<그림 7> 피토우관(pitot tube)

물의 흐름이 1에서는 정지하기 때문에 $V_1=0$ 이 되고 , 2에서는 흐름에 난류가 일지 않기 때문에 이곳의 유속은 V 와 같다. 또한 1, 2의 구멍의 크기(가능한 한 크기의 차이를 적게 함)를 H 라고 하면

$$\frac{P_1}{\gamma} + H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2}{2g} + H \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (12)$$

따라서 $V = \sqrt{2g(P_1 - P_2)/\gamma}$

압력의 차는 관내의 물기둥 높이의 차 h 로서 구한다. 따라서 (10)식을 사용하여 $P_1 - P_2 = h \rho g$ 로 하면

$$V = \sqrt{2gh} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (13)$$

이 된다. $h=10\text{cm}$, $V=1.4\text{m/sec}$ 이다. (12)식에서 P_2 는 난류가 아닌 상태의 흐름 압력이기 때문에 이것을 정압이라고 부르고, P_1 은 흐름은 정지하므로 1점은 고임점이 되기 때문에 관내의 압력을 측정하면 흐름의 총압을 알 수 있다. 한편 이의 차 $\gamma V^2/2g$ 를 동압이라고도 부른다.

5) 제트의 운동

압력을 가하여 노즐로부터 분출시킨 물 제트는 내부가 매우 교란한 상태이기 때문에 순식간에 물방울로 되어 흩어지려 하여 공기저항을 많이 받아 속도가 급속히 떨어진다. 이때 압력을 과도하게 가하면 오히려 안개상태로 되어 속도가 더 크게 저항한다. 따라서 실을 멀리까지 보내기 위하여 너무 분출속도를 높이는 것도 상책은 아니다. 반면에 물줄기를 둥근 봉모양으로 느린 속도로 분출시켜도 선단은 공기와 충돌하여 부풀어 오르며 가늘게 갈라지고 결국은 물방울로 변하게 된다. 또한 물의 양이 적으면 물줄기가 사행하며 외측부분부터 굴곡을 일으켜 사행은 더욱 심하게 되고 물줄기는 잘려지게 된다. 따라서 물제트에 의해 실을 비주시키는 경우는 이러한 성질을 충분히 감안해야 한다.

다. 실의 운동

1) 실이 받는 저항력

실이 공기와 물에 이끌릴 때 받는 저항력은 일반적으로 다음과 같이 나타난다.

$$F = C \frac{1}{2} \rho V^2 S \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (14)$$

그리고 <그림 8>의 (1)과 같이 실이 흐름에 대해 수직일 때는

$C = C_D$ = 저항력 계수

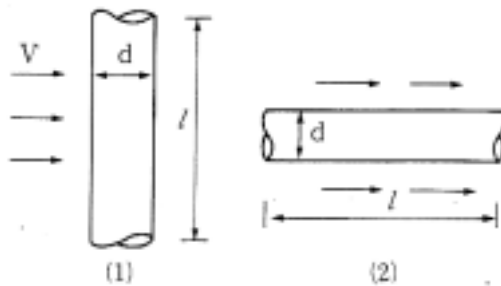
S = 흐름에 수직인 면적 = $d \times l$

이 된다. 공기의 실인 경우의 C_D 치는 <그림 9>와 같은데 가로축의 R 은 Reynolds수라고 부르고 다음 식으로 나타낸다.

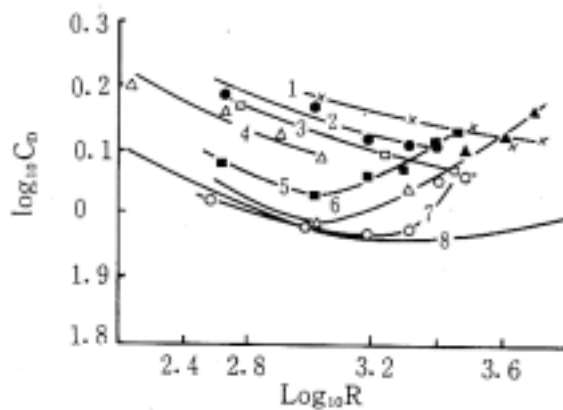
$$R = \frac{V_d}{\nu} (= \frac{V_d}{1.512} \times 10^5, \text{표준공기일 때}) \cdot \cdot \cdot \cdot (15)$$

ν = 유체의 동점성 계수

ρ = 유체의 밀도



<그림 8> 실의 자세



<그림 9> 고속풍동(wind tunnel) 실험에 의한 실의 공기저항력 C_D (Mark)

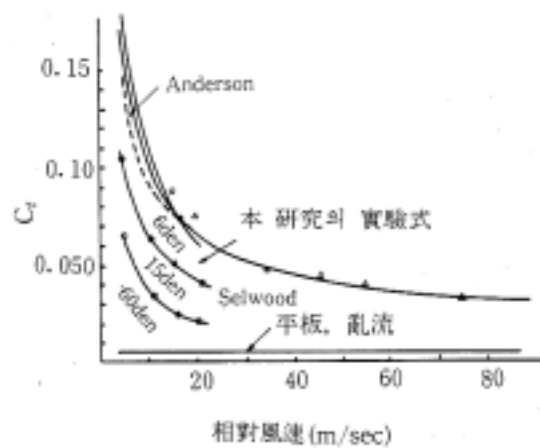
잔털이 많은 실은 나일론보다도 저항이 크지만 풍속이 200m/sec로 높으면 잔털이 누워 나일론과 비슷하다는 것을 실험을 통해서 알 수 있다.

실의 흐름에 대하여 <그림 8>의 (2)와 같은 경우에는

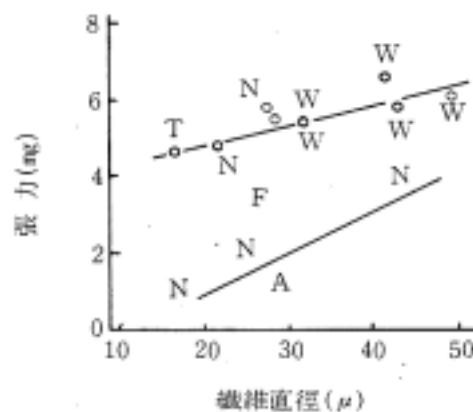
$$C=C_f=\text{마찰저항력 계수}$$

$$S=\text{흐름에 따라가는 실의 표면적}=\pi d \times l$$

이 된다. <그림 10>은 C_f 치의 예를 나타낸 것이다. 일반적으로 실은 크림프 (crimp)가 있기 때문에 매끄러운 원기둥 모양에 비하여 장력을 많이 받는다. 이 비교를 보인 것이 <그림 11>이다.



<그림 10> 실의 공기마찰계수, C_f



<그림 11> 크림프에 의한 저항의 변화

2) 실의 운동

노즐내에 정지해 있던 위사는 제트분사에 의해 전술한 저항력으로 추진력을 받아 비주하며 점차 속도를 올리게 된다. 그러나 식(14), (15) 중의 속도는 실과 공기 또는 물과의 상대속도(=유속-사속)이기 때문에 사속이 증가함과 동시에 상대속도는 감소하므로 <그림 3>에서 볼 수 있는 것처럼 사속이 증가하다가 점점 감소를 나타낸다. 즉, 비주와 함께 실의 운동과 관계하는 사장(즉, 실 중량의 증가), 노즐 후방에서의 실의 당김(pull)저항, 벌룬저항, 가이드저항 등도 사속의 저하요인인 것이다. 더욱이 비주중의 실은 꾸불꾸불하게 굽기 때문에 이것을 그대로 바디칩하면 결점이 생긴다. 따라서 개구관통후에는 어떤 방법으로라도 위사를 긴장시켜 반듯하게 실을 펴주어야 한다.