

01 유체역학

핵심 1 펌프 · 송풍기의 동력

출제경향과 대책

펌프나 송풍기에 대한 문제는 출제빈도가 크다. 따라서 펌프나 송풍기가 유체에 미치는 에너지(전양정 or 전압)를 고려한 베르누이 식을 세울 수 있도록 하는 것과 펌프효율의 정의와 펌프의 전양정이나 송풍기의 전압으로부터 동력을 산출할 수 있도록 해 놓을 필요가 있다.

1. 펌프의 양정

펌프를 이용하면 어느 수위의 물을 그보다 더 높은 곳으로 퍼 올릴 수가 있다. 펌프가 실제 퍼 올릴 수 있는 높이를 실양정(actual head)라 한다.

- ① 흡입 실양정 : 흡입수면에서 펌프 중심까지의 높이
- ② 토출 실양정 : 펌프 중심에서 토출 수면까지의 높이
- ③ 실양정 = 흡입 실양정 + 토출 실양정

즉,

실양정 : 유체를 낮은 곳에서 높은 곳으로 퍼 올릴 경우 흡수면에서 토출수면까지의 수직거리

또한, 펌프가 물을 퍼 올리는 도중에 관내의 마찰손실 및 기타의 손실이 발생하므로 펌프는 그 손실분만큼 물에 에너지를 더 주어야만 한다. 실양정에 이러한 여러 손실에 해당하는 헤드를 더한 것을 펌프의 전양정(total head)라 한다.

$$\text{전양정}(H) = \text{실양정}(h_d) + \text{손실수두}(h_f) + \text{속도수두}(h_v)$$

- 손실수두 h_f : 흡입배관 및 토출배관에서 발생하는 압력손실(마찰손실 + 기기 및 기타저항)
- 속도수두 h_v : 배관흡입구 및 토출구에서 발생하는 압력손실

(속도수두는 펌프의 경우 다른 항에 비하여 적어 생략하는 경우가 보통이다.)

$$\begin{aligned} H &= \text{출구의 전수두} - \text{입구의 전수두} \\ &= H_2 - H_1 + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} [\text{m}] \\ &= h_d + h_s + \left(\lambda_d \frac{v_d^2}{2g} + \lambda_s \frac{v_s^2}{2g} \right) + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} [\text{m}] \end{aligned}$$

흡입관과 토출관의 지름이 같을 경우에는 $v_s = v_d = v$ 이므로

$$H = (h_d + h_s) + (\lambda_d + \lambda_s) \frac{v^2}{2g} [\text{m}]$$

\downarrow \downarrow
 (실양정) (관로의 손실수두)

여기서,

H_1, H_2 : 입구 및 출구의 압력수두

h_s, h_d : 흡입 실양정, 토출 실양정

v_s, v_d : 흡입관, 토출관내의 유속

λ_s, λ_d : 흡입관로 및 토출관로의 마찰손실계수

예제 01

깊이 6m의 지하수를 20m 높이의 저수조에 퍼 올리는 펌프의 전양정은 얼마인가?
(단, 관로의 전손실수두는 3m로 한다. 또한 토출관 및 흡입관의 관지름은 같다.)

정답

토출관 지름=흡입관지름 이므로

$H = (h_d + h_s) + (\lambda_d + \lambda_s) \frac{v^2}{2g}$ 에서 문제의 조건에서 흡입실양정 $h_s=6\text{m}$, 토출실양정 $h_d=20\text{m}$,

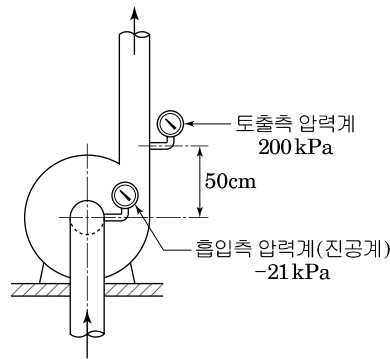
또한 관로의 전손실수두 $(\lambda_d + \lambda_s) \frac{v^2}{2g} = 3\text{m}$ 이므로

$$H = (6 + 20) + 3 = 29 [\text{m}]$$

답 : 29[m]

예제 02

운전 중의 펌프의 압력을 측정한 결과 토출측에서는 200kPa, 흡입측에서는 -21kPa이었다. 이 펌프의 전양정은 몇 m인가? (단 압력계는 아래 그림과 같이 부착되어 있는 것으로 하고 흡입관과 토출관의 지름은 같은 것으로 한다.)



정답

펌프가 유체에 준 에너지(전양정) H 을 고려하여 베르누이 식(에너지 방정식)을 세우면

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + H = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 [\text{m}] \text{이다.}$$

여기서, $v_1 = v_2$, $z_2 = z_1 + 3$, 이므로

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_1 + 3) - z_1$$

$$\therefore H = \frac{\{200 - (-21)\} \times 10^3}{10^3 \times 9.8} + 0.5 = 23.05 [\text{m}]$$

답 : 23.05[m]

2. 펌프 및 송풍기의 효율, 소요동력

(1) 펌프

$$\eta_p = \frac{L_w}{L_s}$$

$$L_w = \rho g H Q / 1000$$

$$L_s = \frac{L_w}{\eta_p} = \frac{\rho g H Q}{\eta_p}$$

여기서,

η_p : 펌프 효율

L_w : 수(이론)동력[kW]

L_s : 축동력[kW]

Q : 송수량[m³/s]

예제
03

펌프의 성능시험결과, 펌프 입구와 출구의 압력차가 490kPa, 유량이 0.2m³/s, 축동력이 150kW이었다. (물이 보유한 운동 및 위치 에너지와 펌프의 입구와 출구의 차이는 무시하는 것으로 한다.)

이 펌프의 전양정[m] 및 펌프 효율[%]을 구하시오.

정답

$P = \rho g H$ 에서

$$\textcircled{1} \text{ 전양정 } H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = \frac{490 \times 10^3}{10^3 \times 9.8} = 50[\text{m}]$$

$$\textcircled{2} \text{ 펌프 효율 } \eta_p = \frac{\rho g H Q}{L_s} = \frac{1000 \times 9.8 \times 50 \times 0.2}{150 \times 10^3} = 0.65 = 65\%$$

예제
04

전양정 24m, 양수량 0.03m³/s로 운전하는 펌프가 있다. 이 펌프의 이론동력은 얼마인가? 또 펌프효율을 70%라 하면 축동력은 얼마인가? (단, 물의 밀도는 1000kg/m³으로 한다.)

정답

$$\textcircled{1} \text{ 이론동력(수동력) } L_w = \rho g H Q = 1000 \times 9.8 \times 24 \times 0.03 = 7056[\text{W}] = 7.056[\text{kW}]$$

$$\textcircled{2} \text{ 축동력 } L_s = \frac{L_w}{\eta_p} = \frac{7.056}{0.7} = 10.08[\text{kW}]$$

예제 05

펌프로 액면이 지하 4m에 있는 수조의 물을 액면 높이가 지상 6m인 압력탱크까지 유량 2m³/min으로 양수하려고 한다. 압력탱크의 압력수두는 게이지압으로 20m, 관로의 손실수두가 5m인 경우에 펌프의 축동력[kW]은? (단, 펌프효율은 65%로 한다.)

정답

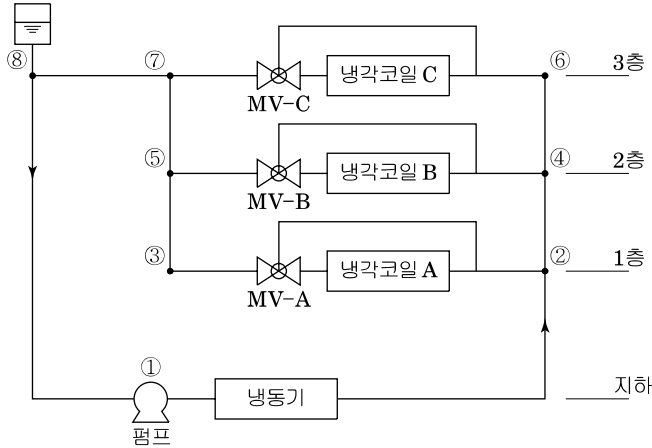
$$\text{축동력 } L_s = \frac{\rho g H Q}{\eta_p} = \frac{10^3 \times 9.8 \times 35 \times 2/60}{0.65} = 17589.7 [\text{W}] = 17.59 [\text{kW}]$$

여기서, 전양정 $H = \text{실양정} + \text{마찰손실수두} + \text{기타저항} = (4+10) + 5 + 20 = 35\text{m}$

답 : 17.59[kW]

예제문제 06

다음 그림과 같은 냉수 배관 계통도를 보고, 주어진 조건과 배관마찰 손실선도를 이용하여 다음 물음에 답하시오.



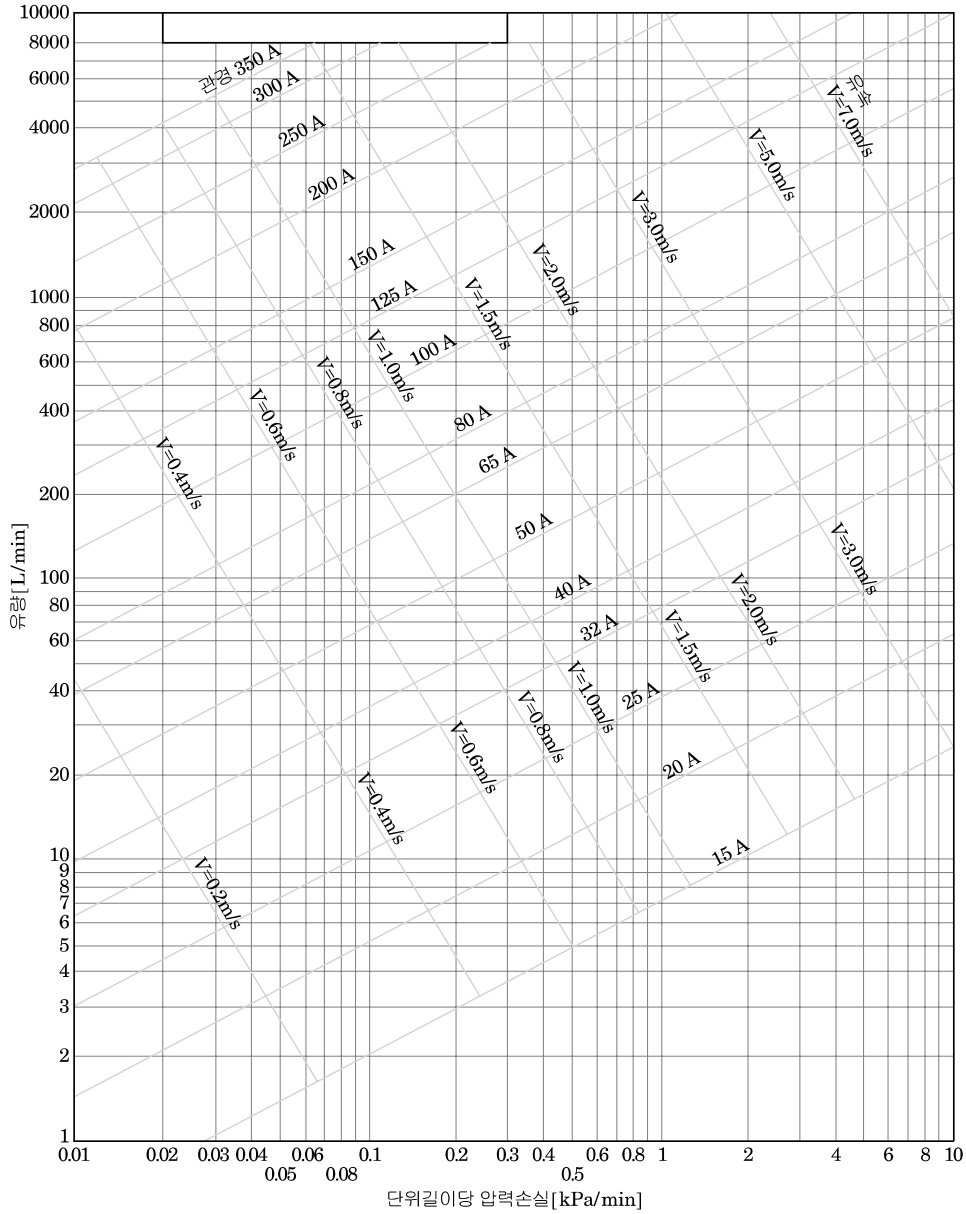
<계산조건>

- | | |
|---|--|
| <p>(1) 냉각코일부하
: A=55kW, B=100kW, C=80kW</p> <p>(2) 냉각코일 입출구 수온
: 입구 7℃, 출구 12℃</p> <p>(3) 직관길이
①-② : 20m, ⑦-⑧ : 30m, ⑧-① : 40m
②-④, ④-⑥, ③-⑤, ⑤-⑦ : 4m
②-③, ④-⑤, ⑥-⑦ : 6m</p> | <p>(4) 기기저항
: A=5mAq, B=4mAq, C=5mAq
MV-A=5mAq, MV-B=7mAq
MV-C=7mAq, 냉동기=13mAq</p> <p>(5) 물의 비열은 4.2kJ/kg·K이며, 밀도는 1,000kg/m³로 한다.</p> <p>(6) 냉수펌프의 효율은 40% 이다.</p> <p>(7) 배관의 열손실은 무시한다.</p> |
|---|--|

- 냉각코일 A, B, C의 순환수량 Q_A , Q_B , Q_C (L/min)을 구하시오.
- 냉수배관 ①-②, ②-④, ③-⑤의 각 유량(L/min) 및 관경(A)을 선도로부터 선정하시오. (단, 유속은 2.5m/s 이하로 하고, 단위 길이당 마찰저항은 500Pa/m로 할 것)

구간	유량(L/min)	관경(A)
①-②		
②-④		
③-⑤		

- 3) 냉수펌프에 대한 전양정(m) 및 축동력(kW)을 구하시오. (단, 배관의 국부저항은 직관저항의 50%로 한다.)
 4) 냉수펌프를 고효율펌프(효율 60%)로 교체할 때 절감되는 축동력(kW)을 구하시오.



정답

- 1) 냉각코일 A, B, C의 순환수량 Q_A, Q_B, Q_C

$$Q_A = \frac{55 \times 3,600}{4.2 \times 60 \times (12 - 7) \times 1 [\text{kg}/\ell]} = 157.14$$

$$Q_B = \frac{100 \times 3,600}{4.2 \times 60 \times (12 - 7) \times 1 [\text{kg}/\ell]} = 285.71$$

$$Q_C = \frac{80 \times 3,600}{4.2 \times 60 \times (12 - 7) \times 1 [\text{kg}/\ell]} = 228.57$$

- 2)

구간	유량(L/min)	관경(A)
①-②	671.42	100
②-④	514.28	80
③-⑤	157.14	50

3) 직관길이 = 20 + 4 + 4 + 6 + 30 + 40 = 104mm
 $104 \times 1.5 \times 500 [\text{Pa/m}] = 78,000 [\text{Pa}]$
 $P = \rho g H$
 $H = \frac{P}{\rho g} = \frac{78,000}{1,000 \times 9.8} \doteq 7.96 \text{m Aq}$
 전양정 $H = 7.96 + 13 + 5 + 7 = 32.96 \text{m Aq}$
 소요동력 = $\frac{9.8 \times 32.96 \times 671.42}{1,000 \times 60 \times 0.4} = 9.04 [\text{kW}]$

4) $9.04 \times \frac{60-40}{60} = 3.01 [\text{kW}]$

(2) 송풍기

베르누이 정리에서 공기의 경우 위치에너지를 무시하고 송풍기가 공기에 주는 압력 $P_t [\text{Pa}]$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + H = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 [\text{m}]$$

에서 공기의 경우 $z_1 = z_2$ 하면

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 + \rho g H = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_2 [\text{Pa}]$$

$$P_t = \rho g H = \left(P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \right) - \left(P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} \right) [\text{Pa}]$$

$$P_t = P_{t2} - P_{t1}$$

이와 같이 송풍기가 공기에 주는 압력 P_t 는 흡입구와 토출구의 전압차로 된다. 또한 송풍기가 공기에 주는 이론동력 L_a 는 풍량 $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ 와 전압차 P_t 의 곱($L_a = Q P_t$)으로 나타내며 효율

$\eta = \frac{L_a}{L_s}$ 의 정의로부터 $L_s = \frac{Q P_t}{\eta}$ 가 된다.

또한 전동기 출력 L_M 은 $L_M = \frac{L_s(1+\alpha)}{\eta_M}$

여기서, α : 여유율 0.1~0.2(다익형 이외 : 0.05~0.1)

η_M : 모터효율

■ 송풍기의 압력

① 송풍기 전압(P_T) = 공기 반송계의 전압손실

송풍기 토출구와 흡입구의 전압의 차, 즉 송풍기에 가해지는 전압의 증기량이다.

$$P_T = P_{T2} - P_{T1}$$

여기서, P_{T1} : 송풍기의 입구측 전압[Pa]

P_{T2} : 송풍기 출구측 전압[Pa]

② 송풍기 정압(P_S)

송풍기 전압(P_S)는 전압(P_T)로부터 송풍기 출구측 동압(P_v)을 제한 값이다.

$$P_S = P_T - P_{v2}$$

여기서, 송풍기 토출측 동압 $P_{v2} = \frac{\rho v_2^2}{2} [\text{Pa}]$

ρ : 공기의 밀도(표준 대기압에서는 $1.2 [\text{kg/m}^3]$)

v_2 : 송풍기 출구 풍속[m/s]

예제
07

덕트 내를 흐르는 공기 유속이 10m/s, 정압이 196Pa일 때 동압(P_v) 및 전압(P_T)은 각각 몇 Pa인가? (단, 공기의 밀도는 1.2kg/m^3 , 모든 압력은 게이지압력이다.)

정답

덕트의 전압(P_T)=정압(P_s)+동압(P_v)

동압(P_v)= $\frac{v^2}{2}\rho$ [Pa]에서

여기서, v : 관내 유속[m/s]

ρ : 공기의 밀도[kg/m^3]

g : 중력가속도[9.8m/s^2]

$$P_v = \frac{10^2}{2} \times 1.2 = 60[\text{Pa}]$$

\therefore 덕트의 전압(P_T)= $196+60=256[\text{Pa}]$

답 : 동압 60[Pa], 전압 256[Pa]

예제
08

덕트 사이즈 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$, 덕트 길이 25m, 엘보 2개, 레듀서 1개로 구성되어 있는 공조 덕트에서 풍량이 $2,350\text{m}^3/\text{h}$ 일 때, 부속류에 해당 되는 정압 손실(Pa)은 약 얼마인가? (단, 엘보의 국부손실계수는 0.12, 레듀서의 국부손실계수는 0.5, 중력 가속도는 9.8m/s^2 , 공기밀도는 1.2kg/m^3 이다.)

정답

$$\textcircled{1} \text{ 풍속} = \frac{Q}{A} = \frac{2350}{0.25 \times 0.25 \times 3,600} = 10.44\text{m/s}$$

$$\textcircled{2} \text{ 국부저항 손실(정압손실)} P_a = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \text{에서}$$

$$\text{엘보} = 0.12 \times \frac{1.2 \times 10.44^2}{2} \times 2 = 15.67[\text{Pa}]$$

$$\text{레듀서} = 0.5 \times \frac{1.2 \times 10.44^2}{2} = 32.70[\text{Pa}]$$

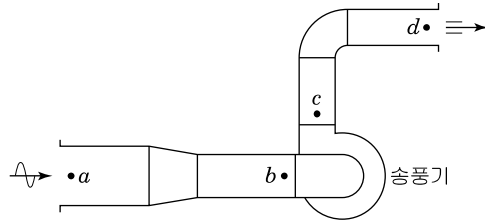
$$\therefore 15.67+32.70=48.37[\text{Pa}]$$

여기서, ζ : 국부손실계수

답 : 48.37[Pa]

예제 09

다음과 같은 덕트 계통에서 그림 중의 a~d의 각 위치에서의 전압 및 동압이 표의 값일 때 「송풍기 전압」 및 「송풍기 정압」을 구하시오. (단, 공기는 정상상태로 흐르는 것으로 하고 공기의 밀도는 1.2kg/m^3 로 한다.)



위치	전압(Pa)	동압(Pa)
a	-20	20
b	-70	30
c	190	50
d	50	50

정답

송풍기 전압 P_T 는 송풍기 토출측전압 P_{T2} 와 흡입측 전압 P_{T1} 차이므로

$$P_T = P_{T2} - P_{T1} = 190 - (-70) = 260 [\text{Pa}]$$

송풍기 정압 P_S 는 송풍기 전압 P_T 에서 송풍기 토출측동압 P_{d2} 을 뺀 값이다.

$$P_S = P_T - P_{d2} = 260 - 50 = 210 [\text{Pa}]$$

예제 10

흡입측에 294Pa (전압)의 저항을 갖는 덕트가 접속되고, 토출측은 평균풍속 10m/s 로 직접 대기에 방출하고 있는 송풍기가 있다. 이 송풍기의 축동력은? (단, 풍량은 $300\text{m}^3/\text{min}$, 송풍기 정압효율은 0.5 로 한다.)

정답

축동력 $L_s = P_T \cdot Q / \eta_T$ 또는 $P_S \cdot Q / \eta_S$ 이다.

여기서, P_T : 전압(Pa), η_T : 전압효율, Q : 송풍량(m^3/s)

P_S : 정압(Pa), η_S : 정압효율

흡입측에 덕트가 설치되어 있고 토출측은 대기에 개방되어 있으므로 토출측 정압

$P_{d2} = 0$, 송풍기 정압 = 송풍기 흡입측 전압(송풍기 흡입측의 전저항)이므로

$$L_s = \frac{294 \times 300 / 60}{0.5} = 2940 \text{ W} = 2.94 \text{ kW}$$

답 : 2.94[kW]

예제
11

송풍기에 대한 다음 내용에 대해 보기 중 ()속에 들어갈 가장 적절한 용어를 선택하여 그 기호로 답하시오. 또한 (3)를 답하시오.

- (1) 송풍기 토출측 정압을 P_{s2} [Pa], 토출측 유속을 v_2 [m/s], 송풍공기의 밀도를 ρ [kg/m³]라 하면 토출측 전압 P_{t2} [Pa]은 다음 식으로 표현된다.

$$P_{t2} = P_{s2} + (1)$$

- (2) 송풍기 토출측의 전압을 P_{t2} [Pa], 흡입측 전압을 P_{t1} [Pa], 풍량을 Q [m³/s], 송풍기 효율을 η 라 하면, 송풍기의 축동력 L_s 은 다음 식으로 표현된다.

$$L_s = (2)$$

【보기】

- | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| ㉠ $\frac{\rho v_2}{g}$ | ㉡ $\frac{\rho v_2}{2}$ | ㉢ $\frac{\rho v_2^2}{2g}$ | ㉣ $\frac{\rho v_2^2}{2}$ |
| ㉤ $\frac{\rho v_2^2}{g}$ | ㉥ ρv_2^2 | ㉦ $\eta(P_{t2} - P_{t1})Q$ | ㉧ $\eta P_{t2}Q$ |
| ㉨ $\frac{(P_{t2} - P_{t1})Q}{\eta}$ | ㉩ $\frac{P_{t2}Q}{\eta}$ | | |

- (3) 송풍기 토출측 전압과 흡입측 전압과의 차가 1,020[Pa], 송풍량 1,500[m³/min], 송풍기 효율이 75%로 할 때 송풍기의 축동력을 구하시오.[kW]

정답

- (1) 1. ㉣
 (2) 2. ㉨
 (3) $L_s = \frac{(P_{t2} - P_{t1})Q}{\eta} = \frac{1,020 \times 1,500/60}{0.75} = 34,000$ [W] = 34 [kW]

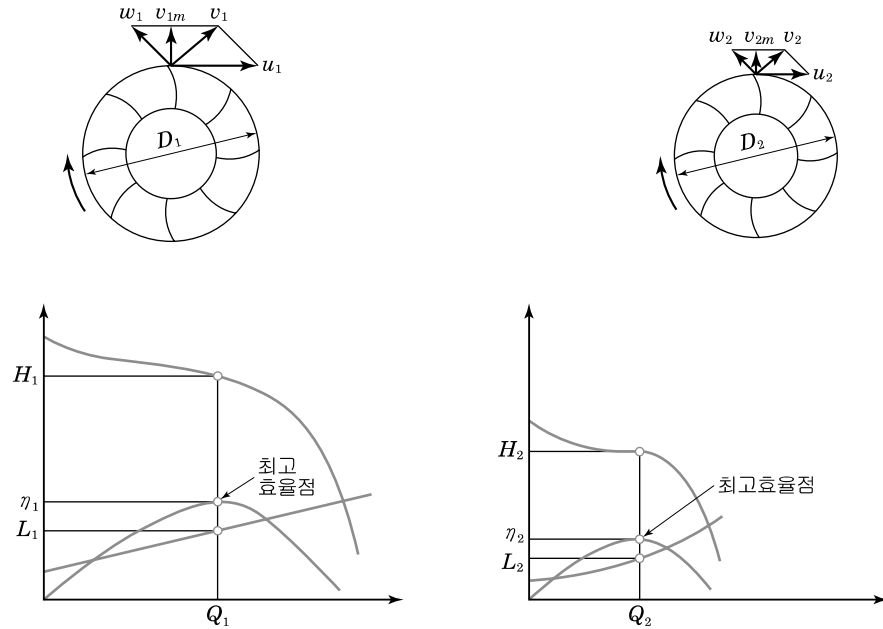
핵심 2 상사(相似)법칙

출제경향과 대책

16년도에 응용되어 출제된 문제로 앞으로도 출제빈도가 클 것으로 예상된다. 상사법칙을 잘 이해하고 그 응용에 대하여 충분한 이해와 대비가 있어야 한다.

1. 펌프의 상사법칙

원심펌프와 축류펌프등의 터보형은 상사율(相似率)이 존재한다.



원심펌프나 축류펌프의 상사법칙은 임의의 임펠러를 형상과 운전 상태를 상사하게 유지하면서 회전수의 변화 ($N_1 \rightarrow N_2$)의 변화에 따라 유량(Q)[m^3/min]과 양정(H)[m] 그리고 소요동력 (L_s)[kW]라 하면, 2개의 펌프 사이에는 다음과 같은 상사율이 성립한다.

- (1) 유량 (Q) : $Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$
- (2) 양정 (H) : $H_2 = H_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$
- (3) 축동력(L_s) : $L_{s2} = L_{s1} \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$

위의 식에서 축동력은 회전수비(N_2/N_1)의 3제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 펌프의 부하변동 즉, 유량과 양정의 변화가 있는 경우라면 인버터를 적용하여 전동기의 회전수를 변화 시켜 소요동력을 감소시킬 수 있다.

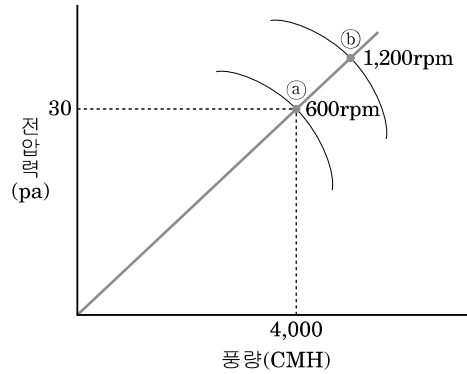
2. 송풍기 상사법칙

- (1) 유량 (Q) : $Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$
- (2) 전압 (P_{T1}) : $P_{T2} = P_{T1} \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$
- (3) 축동력(L_s) : $L_{s2} = L_{s1} \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$

여기서, 첨자1은 처음 상태
 첨자2는 변경 후의 상태

예제
01

원심송풍기의 운전점이 그림과 같이 ㉠점에서 작동 하고 있다. 회전속도가 ㉠점 600rpm에서 ㉡점 1,200rpm으로 증가했을 때 전압력은 약 몇 Pa로 되는가?



정답

송풍기 전압(P_2) : 회전수비의 2제곱에 비례하여 변화 한다.

$$P_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 P_1 = \left(\frac{1,200}{600}\right)^2 \times 30 = 120\text{Pa}$$

예제
02

현열부하를 제거하기 위하여 15°C , $3,000\text{m}^3/\text{h}$ 공기가 75kW 동력의 팬으로 공급되고 있다. 공급온도를 12°C 로 낮추었을 때, 팬 구동을 위한 동력(kW)은 약 얼마인가? (단, 실내 조건은 건구온도 25°C , 상대습도 50% 이다.)

정답

㉠ 송풍량은 취출온도차에 비례한다.

$$\text{실내부하의 조건이 동일한 경우 } \rho Q_1 C \Delta t = \rho Q_2 C \Delta t'$$

ρC 은 동일하므로

$$Q_1 \Delta t = Q_2 \Delta t' \text{ 이다.}$$

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{\Delta t}{\Delta t'} = 3,000 \times \frac{25 - 15}{25 - 12} = 2307.69 [\text{m}^3/\text{h}]$$

㉡ 송풍기 상사의 법칙에서

$$\text{동력 } L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

$$\therefore L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 = L_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 = 75 \times \left(\frac{2307.69}{3,000}\right)^3 = 34.1 \approx 34 [\text{kW}]$$

핵심 3 비속도(比速度, specific speed) : N_s

출제경향과 대책

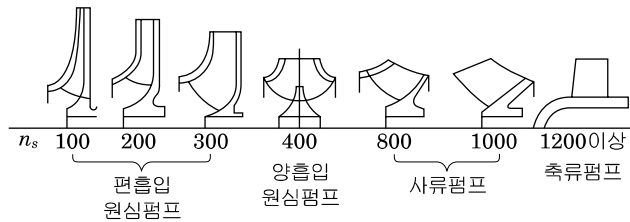
펌프나 송풍기를 선정할 때 이용하는 비속도는 아직까지는 에너지 평가사 2차 실기에는 출제되지 않았으나 가능하면 비속도의 정의식을 기억할 것을 권한다. 또한 비속도의 값으로부터 어떤 종류의 펌프나 송풍기를 선정하는가를 정리하여 놓을 필요가 있다. 그리고 펌프나 송풍기의 종류에 따른 특징에 관해서도 어느 정도 이해하여 놓을 필요가 있겠다.

1. 펌프의 비속도

펌프 날개의 성능을 연구하거나 양정이나 수량에 적합한 임펠러를 선정하는 경우에 비속도를 이용한다. 실제 펌프와 기하학적으로 상사로 만들어진 펌프를 단위 토출량[m³/min]에 단위 양정 [1m]를 내게 할 때, 그 회전차에 주어져야 할 회전수를 말한다.

$$N_s = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \begin{array}{l} \text{양흡입 펌프 : } Q/2 \\ \text{다단 펌프 : } H/\text{단수} \end{array}$$

- N : 회전수 min⁻¹
- Q : 토출량[m³/min]
- H : 전양정[m]



비속도와 익근차 형상과의 관계

- ① 비속도는 회전차의 형상을 나타내는 척도이다.
- ② 비속도는 펌프의 특성을 나타내거나 최적 회전수를 결정하는데 이용된다.

2. 송풍기의 비속도

펌프의 경우와 같이 송풍기에도 비속도를 이용한다. 기하학적으로 상사인 익근차에 대해서 크기나 회전수와는 관계없이 비속도는 일정한 값을 갖는다. 송풍기의 비속도는 다음과 같다.

$$N_s = N \frac{\sqrt{Q}}{H_{ad}^{3/4}}$$

여기서, N : 회전수[rpm]

Q : 흡입상태로 환산한 풍량[m³/min]

H_{ad} : 송풍기의 단열헤드 = $\frac{1}{\rho_1 g} (p_{t2} - p_{t1})$ [m]

ρ_1 : 송풍기 흡입공기의 밀도[kg/m³]

p_{t1}, p_{t2} : 송풍기 입구와 출구에서의 전압[Pa]

- 송풍기의 형식과 비속도의 관계

원심 fan : $N_s = 300 \sim 1,000$

원심 Blower : $N_s = 150 \sim 400$

축류 fan : $N_s = 1,000 \sim 2,500$

축류 Blower : $N_s = 1,000 \sim 2,500$

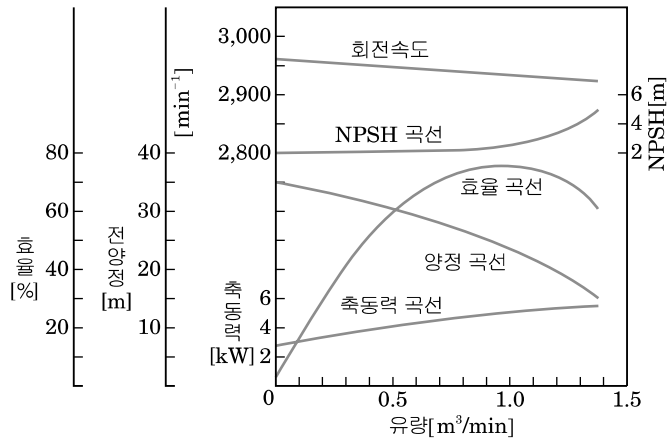
핵심 4 특성곡선 및 펌프의 연합운전 특성

출제경향과 대책

에평사 16년도 출제가 되었던 분야로 펌프 및 송풍기의 특성곡선을 이해하고 펌프 및 송풍기의 설치, 운전, 제어 등 모든 분야의 특성곡선 상에서의 변화를 이해하고 계산할 수 있는 능력을 배양해야 한다.

1. 펌프의 특성곡선

원심식 및 축류식 펌프의 운전특성을 나타낸 그림을 특성곡선이라 한다. 이것은 펌프의 회전수를 일정하게 하고, 유량[m³/min]을 변화시키는 경우의 전양정 H [m] 펌프의 축동력 L [kw], 효율[%]의 변화를 나타낸 것이다.



(1) 펌프의 운전점

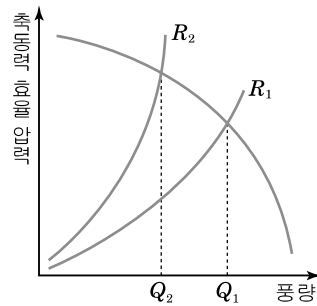
배관계에서는 손실수두는 유량의 2승에 비례하므로 관로의 저항곡선을 펌프의 특성 곡선상에 나타내면 그림과 같이 2차 곡선으로 표시된다. 그래서 양정곡선과 저항곡선의 교점이 펌프의 운전점이 된다.

예제 01

정풍량 방식의 덕트시스템에서 덕트계통의 풍량조절댐퍼가 닫히는 경우 송풍기 성능곡선과 덕트시스템 저항곡선 상의 시스템 운전점은 어떻게 변화하는가?

정답

조절댐퍼가 닫히는 경우 풍량은 감소하고 송풍기의 전압 또는 정압은 상승한다.



2. 연합(직렬 및 병렬)운전 특성

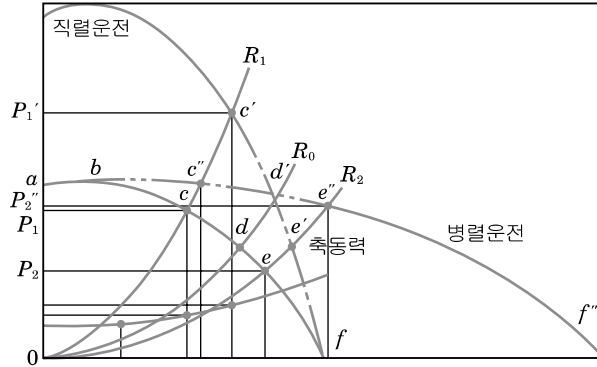
(1) 직렬운전

같은 용량의 펌프(송풍기)를 2대 직렬운전 한 경우
 합성 특성곡선은 동일 유량에 대하여 대수배한 특성으로 총토출량 : Q , 총토출압력 : $2P$ 로 된다.

(2) 병렬운전

같은 용량의 펌프(송풍기)를 2대 병렬 운전한 경우

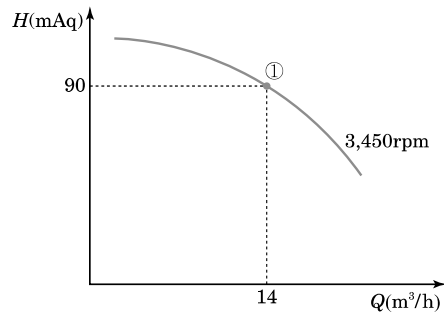
합성 특성곡선은 동일 양정에 대하여 대수배한 특성곡선으로 총도출량 : $2Q$, 총도출압력 : P 으로 된다.



예제 02

아래 그림과 같은 성능을 가지는 펌프가 배관 시스템에 설치되어 있다. 유량이 $14\text{m}^3/\text{h}$ 이고, 회전수가 $3,450\text{rpm}$ 인 초기 운전 점 ①에서 유량을 $12\text{m}^3/\text{h}$ 로 줄이고자 한다. 이때, 펌프 모터 회전수 제어를 이용할 경우 운전 점을 ②, 배관 시스템 상의 밸브를 조절하여 유량을 제어할 때의 운전 점은 ③이라고 할 때, 다음 물음에 답하시오.

<펌프 성능곡선>



<펌프 성능 데이터>

운전점	유량(Q) m^3/h	수두 (H)mAq	효율 (η)%
①	14	90	64
②	12		
③	12	95	62

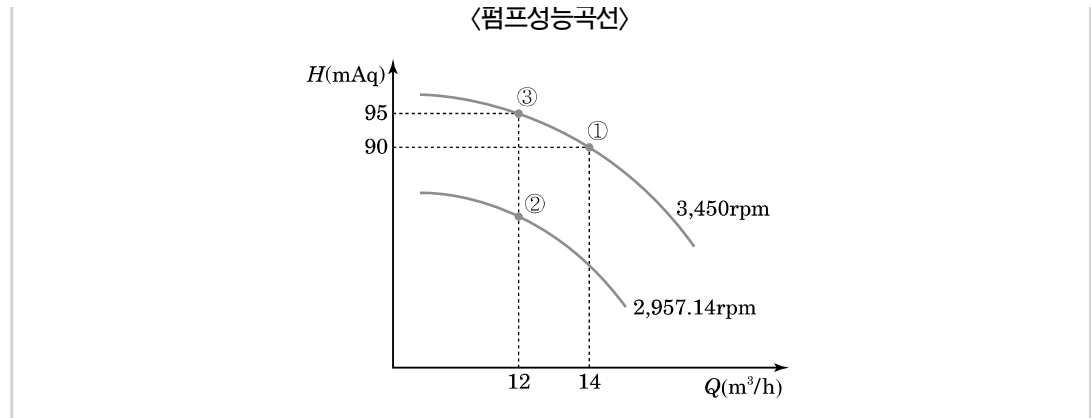
- 주어진 펌프 성능 데이터를 이용하여 각 운전 점 ①, ②, ③의 펌프 축동력(kW)을 구하시오.
- 펌프 성능 곡선 상에 운전 점 ②, ③을 표시하시오.

정답

(1) ① $L_{s1} = gHQ/\eta[\text{kW}] = \frac{9.8 \times 90 \times 14}{3,600 \times 0.64} = 5.36[\text{kW}]$

② $L_{s2} = L_{s1} \times \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 = 5.36 \times \left(\frac{12}{14}\right)^3 = 3.38[\text{kW}]$

③ $L_{s3} = gHQ/\eta[\text{kW}] = \frac{9.8 \times 95 \times 12}{3,600 \times 0.62} = 5.01[\text{kW}]$



핵심 5 펌프 · 송풍기의 특이현상(수격, 서징, 캐비테이션)

출제경향과 대책

펌프나 송풍기에서 발생하는 특이현상으로서 수격작용, 서징현상, 공동현상 등이 있고 이들의 현상과 대책에 관해서 이해하여 놓을 필요가 있다.

1. 수격작용(water hammer)

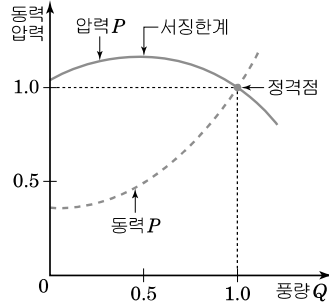
배관계 내의 유체의 속도가 급격히 변화함에 따라 유체압력이 상승 또는 강하하는 현상으로 비교적 긴 송수관으로 액체를 수송하고 있을 때 급격히 밸브를 닫거나 정전 등으로 펌프의 운전이 갑자기 멈춘 경우, 감속되는 분량의 운동에너지가 압력에너지로 변하여 관에 심한 충격을 주는 현상을 말한다.

■ 수격작용 방지법

- ① 관내의 유속을 낮게 할 것(관의 지름을 크게 한다.)
- ② 급격히 밸브를 폐쇄하지 말 것
- ③ 회전체의 관성 모멘트를 크게 할 것(펌프에 플라이 휠(fly wheel)의 설치)
- ④ 양정, 유량에 급격한 변화를 주지 말 것
- ⑤ 조압수조(調壓水槽, surge tank)를 관로에 설치할 것
- ⑥ 밸브를 펌프 송출구 가까이 설치하고 이 밸브를 이용하여 제어할 것

2. 서징(surging)현상

원심형의 송풍기나 펌프를 일정한 회전속도로 운전할 때의 풍량-압력 특성은 그림과 같고, 피크(peak)를 서징한계라 한다. 서징은 배관계를 포함한 계가 자려진동(自勵振動)을 일으켜서 특정 주기로 토출압력이나 유량이 변동을 일으키는 현상을 말한다.



(1) 서징현상의 원인

- ① 공동(cavitation)현상이 발생하여 기체가 생성된 경우
- ② 송출관 내에 수조나 공기조가 있을 때
- ③ 펌프의 $H \sim Q$ 곡선의 우향상승 부분에서 운전될 때
- ④ 유량조절밸브가 탱크의 뒤쪽에 있을 때
- ⑤ 축 트러스트가 불안정할 때
- ⑥ 각부의 공진현상이 발생했을 때

(2) 서징현상의 방지법

- ① 생성된 기체를 제거한다.(또는 공동현상 발생을 방지한다.)
- ② 불필요한 수조나 공기조를 없앤다.
- ③ 펌프의 $H \sim Q$ 곡선의 우하향 부분에서 운전한다.
- ④ 유량조절밸브를 탱크의 앞쪽에 설치한다.
- ⑤ 방출밸브를 사용한다.(소유량시에 송출유량의 일부를 방출하여 펌프나 송풍기의 유량을 적당량으로 유지한다.)
- ⑥ 베인 컨트롤에 의한 방법(원심식)
- ⑦ 동익, 정익을 조절하는 방법(축류식)

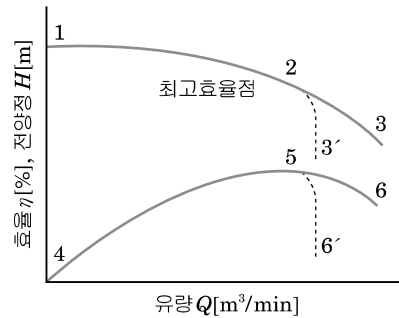
3. 공동(空洞 : Cavitation)현상

흐르고 있는 액체의 임의 지점의 압력이 어느 원인에 의해서 그 압력이 그 액체온도의 포화증기압보다 낮아지면 부분적으로 증발이 일어나고, 액중에 용해되어 있는 기체가 액과 분리되어 기포가 발생하는데 이러한 현상을 캐비테이션 즉, 공동현상이라 한다.

(1) 캐비테이션 발생에 따른 여러 가지 현상

- ① 소음과 진동
- ② 양정곡선과 효율곡선의 저하
- ③ 깃(vane)의 침식(浸蝕)

양정곡선과 효율곡선의 저하



정상운전상태 : $Q-H$ 곡선 1-2-3, $Q-\eta$ 곡선 4-5-6

캐비테이션 발생 : $Q-H$ 곡선 1-2-3', $Q-\eta$ 곡선 4-5-6'

(2) 캐비테이션의 방지법

- ① 펌프의 설치위치를 낮추어 유효흡입수두(NPSH)를 크게 한다.
- ② 펌프의 회전수(임펠러 속도)를 낮추고, 흡입비속도를 작게 한다.
- ③ 양흡입 펌프를 사용하거나 펌프를 2대로 나눈다.
- ④ 흡입관의 지름을 크게 하고 밸브, 곡관 등 관이음의 수를 적게 하여 손실수두를 줄인다.
- ⑤ 부스터(Booster)펌프를 이용하여 흡입조건을 개선한다.
- ⑥ 규정치를 크게 벗어나는 운전을 피한다.

예제 01

펌프의 특이 현상에 대한 다음 내용에 대해 보기 중 ()속에 들어갈 가장 적절한 용어를 선택하여 그 기호로 답하시오.

펌프의 운전에 주의해야할 현상으로서 펌프의 흡입측에 있어서 액체의 압력저하에 따라서 발생하는 (1), 주기적인 압력 및 유량이 변동하는 자려(自勵)진동현상인 (2), 급격한 정지에 의해서 발생하는 (3) 등이 있다.

【보기】

- ㉠ 역류
- ㉡ 서징
- ㉢ 수격작용(water hammer)
- ㉣ 캐비테이션
- ㉤ 돌비

정답

1. ㉣ 2. ㉡ 3. ㉢

4. NPSH(유효 흡입양정)

(1) $NPSH_a$ (Available Net Positive Suction Head) : 이용할 수 있는 유효흡입 양정

- ① 펌프에 관계없이 설치조건 (흡입측배관 또는 계통)에 의하여 결정되는 값
- ② 펌프 흡입 중심까지 유입되는 액체에 주어지는 압력에서 해당 액체 온도에 상당하는 포화 증기압을 뺀 값

$$NPSH_a = \frac{P_s}{\rho g} \pm h_s - f \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g}$$

- p_s : 흡입 수면에 작용하는 대기압[Pa]
- ρ : 사용온도에서의 액체의 밀도[kg/m³]
- g : 중력가속도[m/s²]
- h_s : 흡입수면에서 펌프 중심까지의 높이차. 흡입(-), 압입(+)[m]
- p_v : 사용온도에서의 액체의 증기압[Pa]

(2) $NPSH_r$ [Required Net Positive Suction Head : 필요로 하는 유효흡입 양정]

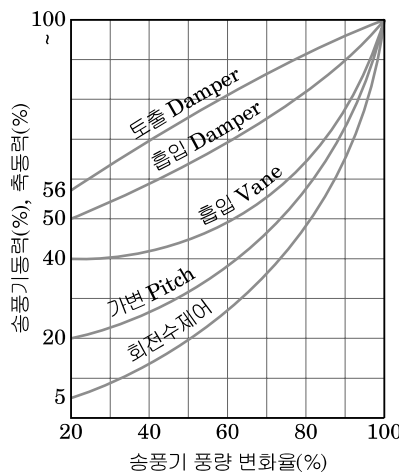
- ① 펌프 자체의 고유성능으로 펌프가 캐비테이션을 일으키지 않고 흡입을 위해 필요한 수두
- ② $NPSH_a$ 와 $NPSH_r$ 의 관계

$$NPSH_a \geq 1.3 \times NPSH_r$$

핵심 6 전동기에서의 에너지절약

출제경향과 대책

에너지절약에 대한 것은 에너지평가사의 자격시험에 응용되어 출제빈도가 아주 높았던 부분으로 특히 2차 실기의 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 따라서 전동기의 에너지절약에 대해서는 반송설비의 에너지절약에서 다루겠지만 펌프, 송풍기의 제어부분과 특성곡선을 이용한 에너지 절감에 대한 사항을 열·유체역학 부분에서 한번 정리할 필요가 있겠다.



송풍기 풍량변화율에 따른 송풍기 동력비율의 변화

■ 동력절감률(에너지 절약)이 높은 것에서 낮은 순서

회전수 제어(가변속 제어) > 가변 pitch제어 > 흡입베인제어 > 흡입댐퍼제어 > 토출댐퍼제어

※ 회전수 제어 : 송풍기 풍량제어의 대표적인 방법으로 에너지 절감 비율이 가장 높다.

※ 제어방식의 결정은 풍량조정범위, 동력절감률, 설비비 등을 고려하여 정한다.

예제 01

송풍기 풍량제어 방법을 5가지 쓰고 에너지 절약효과가 큰 순서대로 나열하십시오. (5점)

정답

회전수제어)가변피치제어 > 흡입베인제어 > 흡입댐퍼제어 > 토출댐퍼제어

예제 02

전동기의 효율 93%, 소비전력 180kW인 펌프가 양정 50m, 유량 700m³/h로 연간 6,500시간 운전하여 양수하고 있다. 이를 동일 전동기, 양정, 유량의 펌프효율 78%인 고효율 펌프로 교체하여 동일한 시간 운전한다면 연간 전력절감량(kWh/년)은 얼마인가?

정답

(1) 펌프의 효율 78%일 때의 소비전력[kW]

$$L_s = \frac{gHQ}{\eta_p} = \frac{9.8 \times 50 \times 700/3600}{0.93 \times 0.78} = 131.35 \text{ [kW]}$$

(2) 연간 전력절감량(kWh/년)

$$(180 - 131.35) \times 6500 = 316225 \text{ [kWh/년]}$$

예제 03

변풍량방식에서 회전수제어를 하는 송풍기 반송동력의 에너지절감 효과에 대해 설명하고, “건축물의 에너지절약 설계기준” 에너지성능지표(EPI)의 기계설비부문에서 비주거용 건물에 공조용 송풍기의 에너지절약적 제어방식을 채택하여 배점을 받을 수 있는 기준을 서술하십시오. (6점)

정답

- ① 변풍량방식에서 회전수 제어를 하는 송풍기 반송동력의 에너지절감 효과
정풍량 공조방식은 냉/난방을 요하는 방들 중 가장 취약한 온도의 방을 기준으로 냉/난방용 공기의 온도를 설정하여 동일한 풍량을 공급하는 방식임. 따라서 가장 온도가 취약한 방을 제외한 방들은 과냉/난방을 하여 에너지낭비를 초래할 수 있다. 변풍량 공조 방식은 설정된 온도의 공기를 각방의 온도에 부합하는 풍량으로 공급함에 따라 과냉/난방의 염려가 없어 냉/난방부하가 감소되며, 배기 및 급기팬에 인버터(VVVF 제어)를 부착하여 저부하시의 팬의 동력소비가 절감되는 효과가 있다.
- ② 기계설비부문에서 비주거용 건물에 공조용 송풍기의 에너지절약적 제어방식을 채택하여 배점을 받을 수 있는 기준
답 : 공기조화용 전체 팬동력의 60% 이상 적용

예제 04

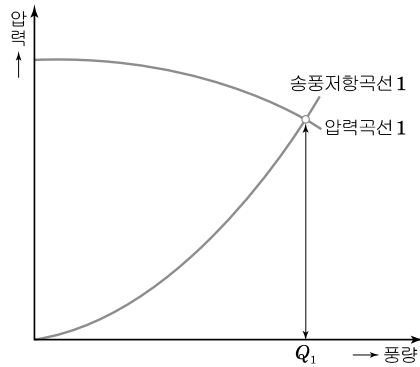
다음 내용에 대해 보기 중 () 속에 들어갈 가장 적절한 용어를 선택하여 그 기호로 답 하시오.

1. 송풍기의 풍량이나 압력을 토출댐퍼 혹은 흡입댐퍼에 의해 조정하는 방법은 관로에 (A)을 가하여 댐퍼에 의해 교축저항을 변화 시켜서 풍량을 조정하는 것으로 송풍 기의 동작점의 (B)이 증가하여 에너지절약효과가 제한 적이다. 한편 회전속도제어 는 (A)곡선에 따라서 (B)도 저하하므로 풍량이 감소될수록 에너지절약효과가 크다.

【보기】

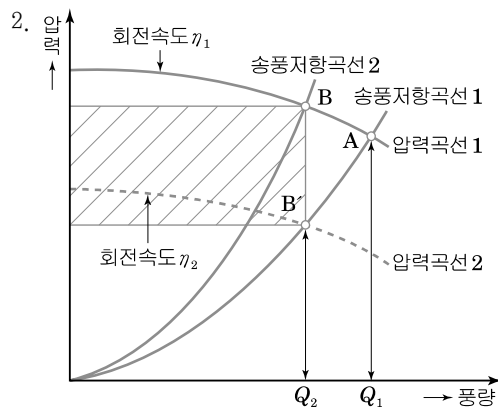
- | | |
|-------|--------|
| ㉠ 압력 | ㉡ 길이 |
| ㉢ 형상 | ㉣ 송풍저항 |
| ㉤ 축입력 | ㉥ 회전속도 |

2. 송풍기 회전속도제어방식에 의한 유량조절과 토출댐퍼에 의한 유량조절을 다음의 특성 곡선상에 표시하고, 회전속도제어일 경우 토출댐퍼조절과 비교하여 절약되는 에너지 절감량을 사선으로 표시하여 답하시오.



정답

1. A ㉢, B ㉠



댐퍼의 개도를 조정하면 그림에서 압력곡선1의 압력이 상승하여 송풍저항곡선2와의 교점B 로 이동(A→B)한다. 이에 따라서 동력은 $P_A Q_1$ 에서 $P_B Q_2$ 로 변화하여 감소한다.

회전속도제어에 의한 방법은 송풍저항곡선을 따라서 압력도 저하하기 때문에 송풍저항곡선 1과의 교점 B'로 이동(A→B')한다. 이에 따라서 동력은 $P_A Q_1$ 에서 $P_{B'} Q_2$ 로 변하여 큰 폭 의 절감효과를 얻을 수 있다. 따라서 그림의 사선부분이 회전수제어에 의해서 얻을 수 있 는 에너지절감량을 나타낸다.

예제
05

원심펌프를 모터직결로 운전하여 전양정 16m로 $0.42\text{m}^3/\text{min}$ 의 물을 퍼 올리고 있다. 이때 모터의 입력을 2.0kW , 모터효율 η_M 을 0.85로 하고 다음 물음에 답하시오. (단, 전달효율을 1.0으로 한다.)

- (1) 펌프의 이론동력 L_o [kW]를 구하시오.
- (2) 펌프의 축동력 L_s [kW]를 구하시오.
- (3) 펌프효율을 구하시오.

정답

- (1) 펌프의 이론동력
- L_o
- [kW]

$$L_o = gHQ = 9.8 \times 16 \times 0.42/60 \approx 1.1$$

- (2) 펌프의 축동력
- L_s
- [kW]

$$L_s = L_M' \cdot \eta_M \cdot \eta_d = 2.0 \times 0.85 \times 1.0 = 1.70$$

- (3) 펌프효율
- η_p

$$\eta_p = \frac{L_o}{L_s} = \frac{1.1}{1.7} = 0.6471 = 64.71\%$$

예제
06

원심펌프를 이용하여 지하 7m의 지하수를 $3.6\text{m}^3/\text{min}$ 으로 지상 40m의 저수탱크로 퍼 올릴 때 다음 물음에 답하시오. (단, 흡입관 및 토출관은 내경 100mm 관을 사용하는 것으로 하고 관의 전(全)길이는 50m, 펌프효율 70%, 관의 마찰계수 0.03, 전(全)손실수두는 관의 마찰손실수두의 1.1배로 한다.)

- (1) 전양정을 구하시오. [m]
- (2) 펌프의 소요 축동력을 구하시오. [kW]

정답

- (1) 전양정
- H
- [m]

$$\textcircled{1} \text{ 유속 } v = \frac{Q}{A} = \frac{3.6/60}{\frac{\pi \times 0.1^2}{4}} = 7.64 [\text{m/s}]$$

$$\textcircled{2} \text{ 관로의 마찰손실수두 } h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0.03 \times \frac{50}{0.1} \times \frac{7.64^2}{2 \times 9.8} = 44.67 [\text{m}]$$

$$\therefore H = \text{실양정} + \text{마찰손실수두} + \text{기타손실수두}$$

$$= (7 + 40) + 44.67 \times 1.1 = 96.14 [\text{m}]$$

- (2) 펌프의 소요 축동력
- L_s
- [kW]

$$L_s = \frac{gHQ}{\eta_p} = \frac{9.8 \times 96.14 \times 3.6/60}{0.7} = 80.76$$

예제
07

펌프의 특이 현상에 대한 다음 내용에 대해 보기 중 ()속에 들어갈 가장 적절한 용어를 선택하여 그 기호로 답하시오.

송풍기의 회전속도가 일정한 상태에서 토출댐퍼를 교축하여 풍량을 저하 시키면, 압력곡선이 우상(右上)인 불안정한 영역으로 들어가 서징이나 (1)등이 발생할 가능성이 있어 주의해야 할 필요가 있다. 또한 그 정도는 아니나 압력손실이 (2)하기 때문에 소요동력이 증대한다.

이러한 문제를 회피하기 위해서는 (3)제어를 이용하는 것이 좋다. 이 제어를 행하면 서징 등이 일어나기 어렵고 보다 저풍량까지 부분부하운전이 가능하고, 송풍기의 축동력은 풍량의 (4)승에 비례하여 저하하기 때문에 에너지 절약효과가 크다. 또한 축류송풍기는 특유의 (5)제어에 의해 부분부하 풍량에서 효율저하가 적기 때문에 에너지 절약효과가 크다.

【보기】

- | | | |
|----------------|---------|----------|
| ㉠ 초킹(chalking) | ㉡ 캐비테이션 | ㉢ 서징 |
| ㉣ 가이드 베인 | ㉤ 선회실속 | ㉥ 동익가변피치 |
| ㉦ 회전속도 | ㉧ 대수 | ㉨ 1 |
| ㉩ 2 | ㉪ 3 | ㉫ 증가 |
| | | ㉬ 감소 |

정답

1. ㉤ 2. ㉥ 3. ㉦ 4. ㉪ 5. ㉥