

■ 펌프의 직·병렬 작동

- 펌프의 직렬작동 : 두 개의 펌프를 직렬연결운전시 두 펌프의 전유량은 단일 펌프의 유량과 같지만 압력은 두 배가 된다.

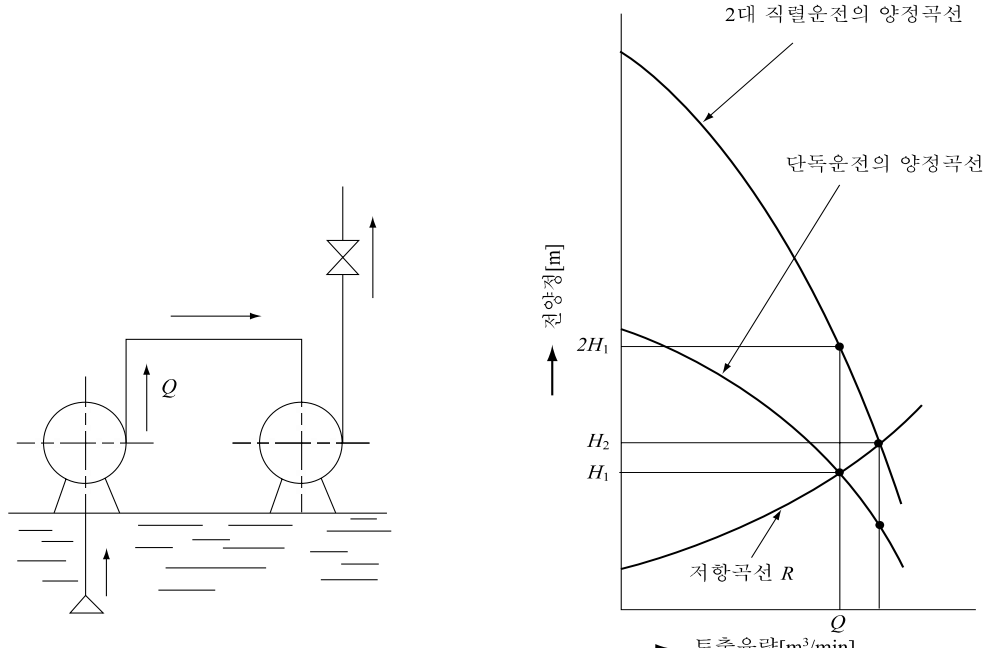


그림 7-6 펌프의 직렬운전

- 펌프의 병렬작동

- 두 개의 펌프가 배출하는 유량은 단일 펌프 유량의 두 배가 되지만 압력의 발생은 단일 펌프와 동일
- 관 계통에서는 마찰저항을 받기 때문에 병렬로 작동하는 두 펌프는 $Q_2 < 2Q_1$

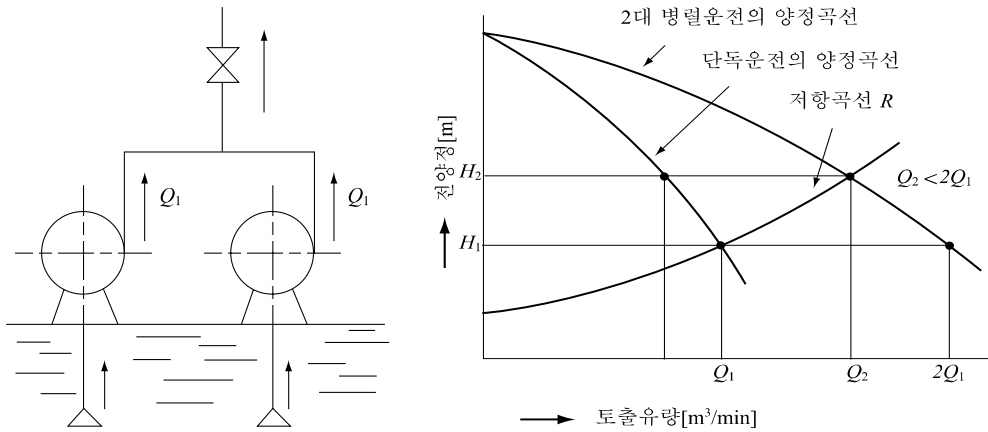


그림 7-7 펌프의 병렬운전

그림 7-8 펌프의 병렬운전의 특성곡선

■ 비속도와 상사의 법칙

- 비속도(Specific speed) :

- 임펠러의 상사성(相似性) 또는 펌프의 특성 및 펌프의 형식을 결정하는데 이용되는 값

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(H/n)^{3/4}}$$

N : 회전수(rpm)

Q : 유량(m^3/min)

H : 양정(m)

n : 단수

① 양흡입 펌프의 경우는 토출량의 1/2로 계산

② 다단 펌프의 경우 전양정은 임펠러 1단의 양정으로 적용

③ 양정이 높고 토출량이 큰 펌프는 비속도가 높음

④ 토출량, 양정이 동일한 경우 회전수가 높을수록 큰 비속도

EX 7-7 양정 220m, 회전수 $N=2,900\text{rpm}$, 비교 회전도 176인 4단 원심펌프에서 유량 $Q[\text{m}^3/\text{min}]$ 을 구하여라.

→→ 단수를 4단으로 하고 있으므로

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{\left(\frac{H}{n}\right)^{3/4}}$$

$$Q = \left(\frac{N_s \left(\frac{H}{n} \right)^{3/4}}{N} \right)^2 = \left(\frac{176 \times \left(\frac{220}{4} \right)^{3/4}}{2,900} \right)^2 = 1.5 [\text{m}^3/\text{min}]$$

EX 7-8 양정 80m,, 토출량 $15\text{m}^3/\text{min}$, 회전수 1800RPM인 펌프가 있다. 편흡입 1단 펌프와 2단 펌프, 양흡입 1단 펌프에 대한 비속도를 구하라.

→→ 편흡입 1단의 경우 $N_s = \frac{1,800 \times 15^{1/2}}{80^{3/4}} = \frac{1,800 \times 3.74}{26.75} = 260.4$

편흡입 2단의 경우 $N_s = \frac{1,800 \times 15^{1/2}}{40^{3/4}} = \frac{1,800 \times 3.87}{15.9} = 438.1$

양흡입 1단의 경우 $N_s = \frac{1,800 \times 7.5^{1/2}}{80^{3/4}} = \frac{1,800 \times 2.74}{26.75} = 184.4$

■ 펌프의 상사의 법칙(Affinity law)

- 비속도가 같으면 펌프의 크기가 다른 경우에도 이를 상사(Affinity)라고 함
- 상사인 펌프의 회전수(N), 임펠러의 지름(D)에 따른 토출량(Q), 양정(H), 축동력(P)의 법칙

- 토출량비 $Q_2 = Q_1 \times \frac{N_2}{N_1} \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$

- 양정비 $H_2 = H_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$

- 축동력비 $L_2 = L_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5$

여기서, N : 회전수(rpm), D : 내경(mm)

EX 7-9 어떤 펌프가 2,000rpm으로 회전하여 전양정 100m에 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 의 수량을 방출한다. 이것과 상사로서 크기가 2배 되는 펌프가 1,500rpm으로 운전될 때 수량은 몇 m^3/s 가 되는가?

→→ $Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \frac{N_2}{N_1} = 0.25 \times \left(\frac{2}{1} \right)^3 \times \frac{1,500}{2,000} = 1.5 [\text{m}^3/\text{s}]$

EX 7-10 어떤 펌프가 매분 2,000회전으로 전양정 100m에 대하여 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 인 수량을 방출한다. 이것과 상사로서 치수가 2배인 펌프가 매분 1,500회전이고, 다른 것은 동일상태로 운전될 때의 전양정을 구하여라.

→→ $H_2 = H_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 100 \times \left(\frac{2}{1} \right)^2 \times \left(\frac{1,500}{2,000} \right)^2 = 225 [\text{m}]$

EX 7-11 주파수가 50사이클 지역에서 펌프의 회전수가 1450RPM인 경우에 양정 25m, 유량 $4\text{m}^3/\text{min}$, 축동력 22kW인 펌프가, 60사이클 지역에서 펌프의 회전수가 1740RPM으로 된다면 축동력은 몇 kW가 되는가?

→→ $L_2 = L_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 = 22 \times (1)^5 \times \left(\frac{1,740}{1,450} \right)^3 = 38 [\text{kW}]$

EX 7-12 정격용량이 82psi에서 1,000gpm이나 디젤 엔진구동 소화펌프가 현장성능 시험서 1700RPM에서 운전되고 있다. 펌프 제조업체의 성능시험 성적서 내용은 다음과 같다.

구 분	체절운전	정격운전시	최대운전시
유 량	0 gpm	1,000gpm	1500gpm
토출압력	99psi($<82 \times 1.4=114$)	82psi	54psi($>0.65 \times 82=53.3$)

반면 1700RPM 운전시의 시험결과치는 다음과 같다.

구 분	체절운전	정격운전시	최대운전시
유 량	0gpm	955gpm	1434gpm
토출압력	90psi	75psi	50psi

펌프 제조업체에서 제시한 성능을 얻기 위해 귀하는 어떤 조치를 취하겠는가? 귀하의 조치가 적절한지 여부를 입증하시오.

→ →

소화펌프 성능 시험: 체절운전(유량=0) 및 최대운전시 압력 여부

1. 제조업체성적서상의 정격유량과 현장시험시의 정격유량을 같게 하기 위해 회전수 조정

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \text{ 에서 } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1000}{955} = \frac{N_2}{1700}, N_2=1,780\text{RPM}$$

2. 회전수 변화에 따른 체절운전시의 양정(압력) 계산

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{H_2}{90} = \left(\frac{1,780}{1,700} \right)^2, H_2 = 98.7\text{psi} (<99\text{psi} < 114\text{psi}) : \text{OK}$$

3. 최대운전시의 유량과 양정

$$\text{- 양정 : } \frac{H_2}{50} = \left(\frac{1780}{1700} \right)^2 \text{ 에서 } H_2 = 54.8\text{psi} > 54\text{psi} > \mathbf{53.3\text{psi}} : \text{OK}$$

$$\text{- 유량 : } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_2}{1434} = \frac{1780}{1700} \text{ 에서 } Q_2 = 1501\text{gpm} (>1500\text{gpm}) : \text{OK}$$

<펌프의 이상현상>

<http://kr.youtube.com/user/rickypigazzini>

■ 공동현상(캐비테이션, cavitation)

- 배관 내, 펌프를 흐르는 액체의 압력이 증기압 이하로 내려갈 때 국부적으로 비등현상이 일어나서 증기가 발생되며 증기 공동(空洞)을 만드는 현상
- 표준 대기압 상태에서 펌프가 끌어올릴 수 있는 물의 최대높이(흡입양정) : **10.33m**
- 실제 최대흡입양정: 관마찰이나 기타의 손실 때문에 약 **6~7m** 정도
- 흡입높이가 그 이상이 되거나 또는 물의 온도가 높아지면 펌프의 흡입구 측에서 물의 일부가 증발하여 기포가 되어 펌프로 흡입
- 펌프에 흡입된 증기의 기포는 임펠러를 거쳐 토출구 측으로 넘어가며 압력이 상승되므로 기포는 물 속으로 다시 소멸
- 소멸순간 격한 음향과 진동 발생(소음, 진동, 관부식 및 심하면 펌프의 흡입불능 현상 초래)
- 원인: 큰 흡입양정, 빠른 유속, 큰 손실수두(와류의 발생, 유로에서의 장애)등
- 캐비테이션방지: 펌프 내에서 포화증기압 이하의 부분이 생기지 않도록 운전

■ 유효흡입수두(NPSH_{av}, available Net Positive Suction Head)

• 유효흡입수두(NPSH_{av})

- 펌프가 **운전될 때**(펌프 특성과는 무관하게)흡입측의 배관 또는 **운전조건에** 따라서 결정
- 펌프흡입구 중심까지 유입되어 들어오는 액체에 대해 외부로부터 주어지는 압력(절대압력)에서 포화 증기압을 뺀 것이 유효 NPSH_{av}**

- $NPSH_{av}$: 압입 또는 작은 흡입양정, 작은 손실수두에서 유리

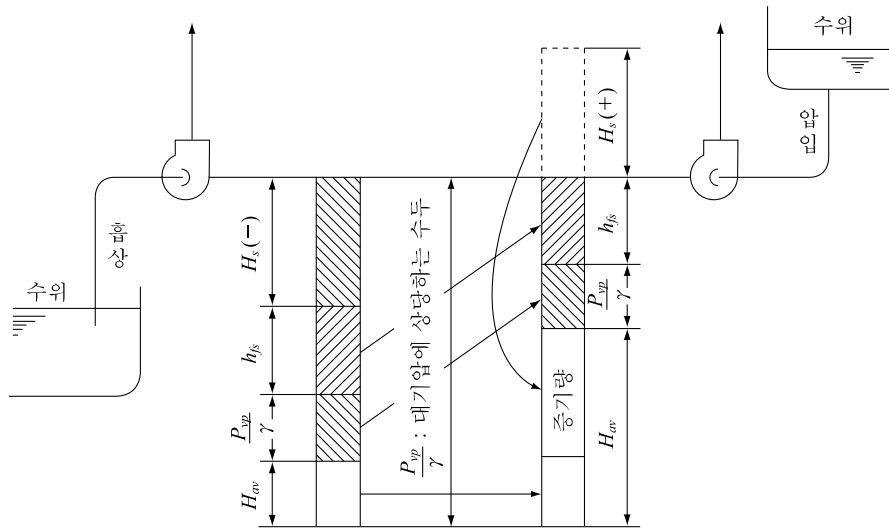


그림 7-9 펌프설비에서 얻어지는 NPSH

$$NPSH_{av} = H_{av} = \frac{P_a}{\gamma} - H_s - h_{fs} - \frac{P_{vp}}{\gamma} \text{ (흡입)}$$

$$NPSH_{av} = H_{av} = \frac{P_a}{\gamma} + H_s - h_{fs} - \frac{P_{vp}}{\gamma} \text{ (압입)}$$

H_{av} : 유효흡입양정($NPSH_{av}$)

P_a : 흡입수면의 절대압력(표준 대기압 : 1.033kg/cm^2)

H_s : 흡입실양정(흡수면에서 펌프 기준면까지의 높이), 흡상일 때(-), 압입일 때(+)

P_{vp} : 사용온도에서의 액체의 포화증기압(kg_f/cm^2)

γ : 사용온도에서의 단위체적당의 중량(kg_f/m^3)

h_{fs} : 흡입손실수두(m),

- $NPSH_{av}$ 은 흡입양정(H_s), 흡입손실수두(토출유량, 유속, 배관길이 등) 등에 크게 좌우

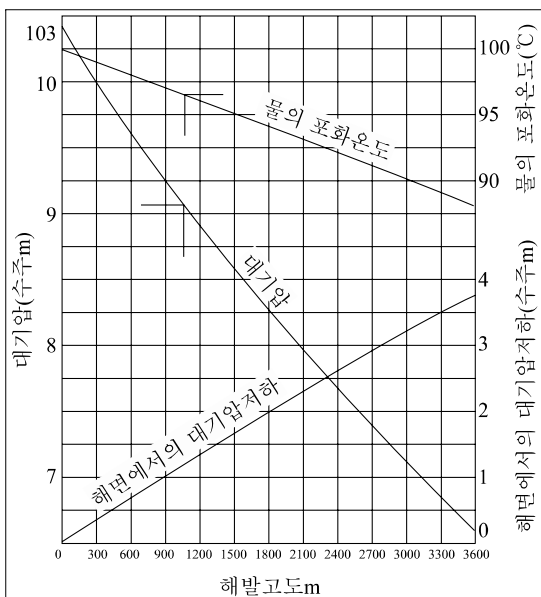
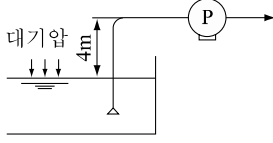
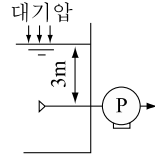


그림 7-14 해발높이와 대기압 및 포화온도

<온도별 포화수증기압>

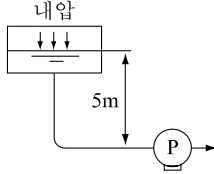
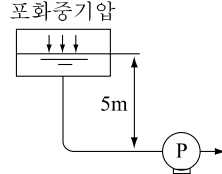
Temp (°C)	포화수증기압 (mmHg)	수두 (mH ₂ O)	Temp (°C)	포화수증기압 (mmHg)	수두 (mH ₂ O)
-10	2.2	0.03	37	47.1	0.64
0	4.6	0.06	40	55.3	0.75
5	6.5	0.09	60	149.4	2.02
10	9.2	0.12	80	355.1	4.81
11	9.8	0.13	95	634.0	8.59
12	10.5	0.14	96	658.0	8.92
13	11.2	0.15	97	682.0	9.24
14	12.0	0.16	98	707.0	9.58
15	12.8	0.17	99	733.0	9.93
20	17.5	0.24	100	760.0	10.30
25	23.8	0.32	101	788.0	10.68
30	31.8	0.43	200	11,659.0	157.98

표 7-3 흡수면에 대기압이 작용하는 경우의 NPSH 계산예

	항 목	흡상의 경우		가압의 경우
		평지대	고지대	
설치 조건	펌프흡입상태			
	액체	물	물	물
	수온(℃)	20	20	20
	해발고도(m)	0	1000	0

	P_a 대기압(Kg _f /m ³ abs)	1.0330×10^4	0.9180×10^4	1.0330×10^4
	P_{vp} 포화증기압(Kg _f /m ³ abs)	0.0238×10^4	0.0238×10^4	0.0238×10^4
	γ 단위체적당 중량(Kg _f /m ³)	998.2	998.2	998.2
	$\pm H_s$ 흡입헤드(m, 수두)	-4	-4	+3
	$f V_s^2 / 2g$ 흡입관 총손실(m)	0.7	0.7	0.5
계산 값	$H_{av} = \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_{vp}}{\gamma} \pm H_s - f \frac{V_s^2}{2g}$	$H_{av} = 10.35 - 0.24$ $-4 - 0.7$ $= 5.41 \text{ m}$	$H_{av} = 9.2 - 0.24$ $-4 - 0.7$ $= 4.26 \text{ m}$	$H_{av} = 10.35 - 0.24$ $+3 - 0.5$ $= 12.61 \text{ m}$

표 7-4 흡입측에 밀폐수조가 있는 경우의 NPSH 계산예

	항 목	내압작용의 경우	포화증기압 작용의 경우
설치 조건	펌프흡입상태		
	액체	물	뜨거운 물
	수온(℃)	20	120(포화상태)
	해발고도(m)	0	0
	P_a 내압(kg _f /m ² abs)	2.0000×10^4	2.0245×10^4
	P_{vp} 포화증기압(kg _f /m ² abs)	0.0238×10^4	2.0245×10^4
	γ 단위체적당 중량(Kg _f /m ³)	998.2	943.1
	$\pm H_s$ 흡입헤드(m, 수두)	+5	+5
	$f V_s^2 / 2g$ 흡입관 총손실(m)	0.7	0.7
계산 값	$H_{av} = \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} \pm H_s - f \frac{V_s^2}{2g}$	$H_{av} = 20.04 - 0.24$ $+5 - 0.7$ $= 24.46 \text{ m}$	$H_{av} = 21.47 - 21.47$ $+5 - 0.7$ $= 4.3 \text{ m}$

■ 필요 흡입수두(NPSH_{re})

- 필요 흡입수두는 펌프 제작사에서 출시될 때 펌프가 가지는 고유 특성
- 펌프의 운전조건(흡입양정, 유량, 손실수두 등)과는 무관
- 펌프 회전차 부근까지 유입된 액체는 회전차에 의해 가압되기 전에 일시적인 압력 강하가 발생하는데 이에 해당하는 수두를 **필요흡입수두(NPSH_{re})**라 함
- 흡입비속도, Thoma의 캐비테이션 계수 또는 실험등으로부터 산출 가능

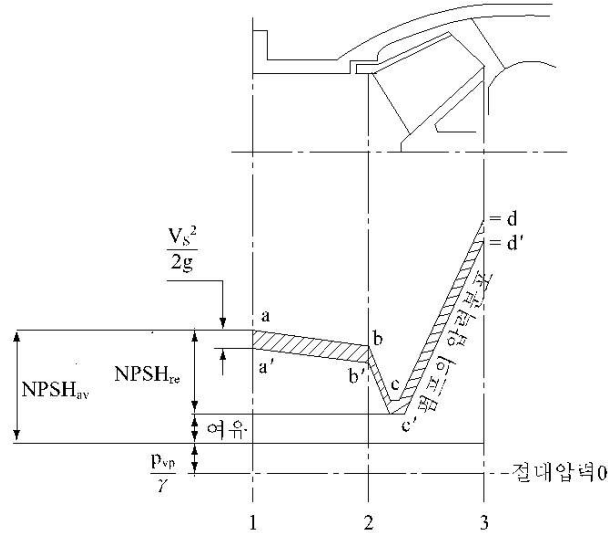


그림 7-15 펌프 흡입측의 압력분포(1.펌프입구, 2.회전차입구, 3.회전차출구)

- Thoma의 캐비테이션 계수

$$\text{NPSH}_{re} = \sigma H$$

σ : Thoma의 캐비테이션 계수(**그림 7-16**). 비속도 n_s 의 4/3승에 비례

H : 임펠러 1단 마다의 효율최고점에 있어서의 전양정(m)

$$\sigma = \left(\frac{n_s}{S} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (\text{그림 7-16})$$

$$S = n \frac{\sqrt{Q}}{\text{NPSH}_{re}^{3/4}}$$

S : 펌프의 흡입비속도[표 7-5]: 펌프 종류별로 거의 일정

Q : 토출유량[m³/min](양흡입의 경우에는 $Q/2$ 가 된다.)

n : 회전속도[rpm], n_s : 비속도

NPSH_{re} : required NPSH(m)

표 7-5 펌프형식과 흡입비속도 S

형 식	S [rpm, m ³ /min, m]
소형 범용 벌루트펌프	1,100~1,400
벌루트펌프($n_s = 150 \sim 600$)	1,200~1,700
사류펌프($n_s = 1,600$)	1,200~1,400
축류펌프($n_s = 900$)	1,100~1,300

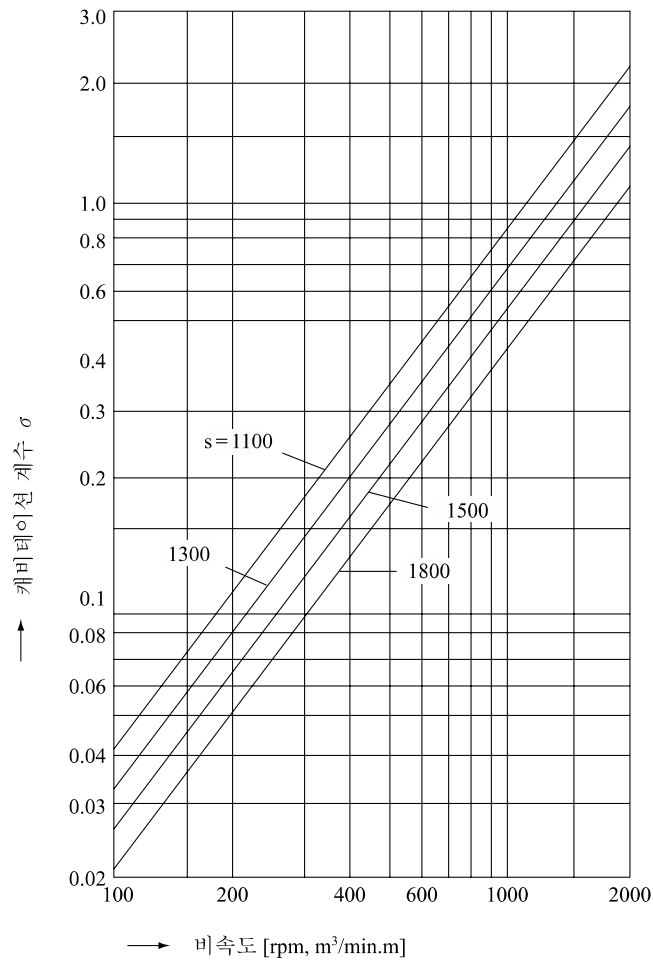


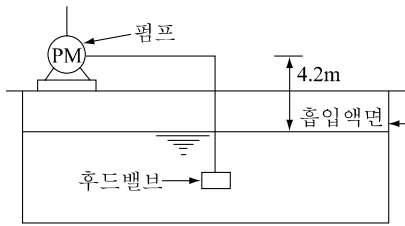
그림 7-16 비속도 n_s 와 σ 의 관계

■ 흡입조건 개선을 위한 대책

• $NPSH_{av}$ 의 충분한 확보

- 펌프의 설치 위치를 가능한 한 낮게 할 것.
- 흡입손실의 최소화 : 흡입관을 가능한 한 짧게 하고, 관내 유속을 작게 할 것
- 흡입관의 구경을 크게 하고 배관을 단순, 직관화 하여 마찰손실을 감소시킬 것.
- $NPSH_{av} > 1.3 \times NPSH_{re} = 1.3\sigma H$ 가 되도록 할 것
- 불가피한 경우에는 편흡입 펌프를 양흡입 펌프로 할 것
- 불가피한 경우 흡수면 보다 펌프를 낮게 설치
- 펌프의 흡입측 밸브에서는 절대로 유량조절을 하지 말 것(손실수두 최소화)
- 계획토출량 보다 현저하게 벗어나는 범위에서의 운전은 피할 것.
- 운전 조건으로 보아 도저히 캐비테이션을 피할 수 없을 때에는 임펠러의 재질을 캐비테이션 침식에 대하여 강한 재질을 선택할 것
- 캐비테이션이 생긴 펌프에 대해서는 소량의 공기를 흡입측에 넣어서 소음과 진동을 적게 할수 있음

EX 7-13 다음 그림은 어느 송수펌프의 계통을 나타내고 있다. 주어진 조건과 그림을 참조하여 이 펌프가 가져야 할 최대이론 NPSH_{av}를 구하시오.



- ① 수온은 25℃이며 이 온도에서의 수증기압력은 0.02kg_f/cm²이다.
- ② 펌프의 사용최대 송수량은 2,000ℓ/min이다.
- ③ 펌프 흡입측 배관의 마찰손실압력은 0.24kg_f/cm²이다.
- ④ 대기압력은 1kg_f/cm², 물의 밀도는 1g/cm³이며 배관에서의 속도 수두는 무시한다.

→ → 수면이 펌프의 중심보다 낮을 때이므로

$$NPSH_{av} = \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_{vp}}{\gamma} - \frac{P_{fs}}{\gamma} - H_s$$

$$P_a : \text{대기압}(\text{kg}_f/\text{cm}^2) = 1 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 10,000 \text{ kg}_f/\text{m}^2$$

$$P_{vp} : \text{포화증기압력}(\text{kg}_f/\text{m}^2) = 0.02 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 200 \text{ kg}_f/\text{m}^2$$

$$\gamma : \text{비중량}(\text{kg}_f/\text{m}^3) = 1 \text{ g/cm}^3 = 1,000 \text{ kg}_f/\text{m}^3$$

$$P_{fs} : \text{흡입측 배관의 마찰손실압력}(\text{kg}_f/\text{m}^2) = 0.24 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 2,400 \text{ kg}_f/\text{m}^2$$

$$H_s : \text{흡입측 실양정}(\text{m}) = 4.2 \text{ m}$$

$$\therefore NPSH_{av} = \frac{10,000}{1,000} - \frac{200}{1,000} - \frac{2,400}{1,000} - 4.2 = 3.2 \text{ m}$$

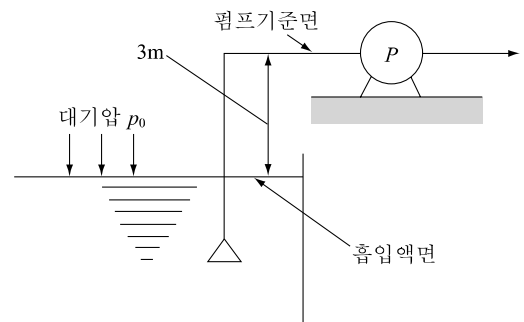
EX 7-14 펌프의 흡입양정이 4m이고 흡입관로 손실수두가 2m일 때, NPSH_{av}를 구하라.(단, 수면상의 대기압 $P_a = 1.033 \text{ kg/cm}^2$, 포화수증기압 $P_{vp} = 0.0332 \text{ kg/cm}^2$, 물비중량 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$)

→ → $NPSH_{av} = H_a - H_s - h_{fs} - H_v$

$$= \frac{P_a}{\gamma} - H_s - h_{fs} - \frac{P_{vp}}{\gamma} \text{가 된다.}$$

$$= \frac{(1.0332 \times 10^4)}{1000} - 4 - 2 - \frac{(0.0332 \times 10^4)}{1000} = 4(\text{m})$$

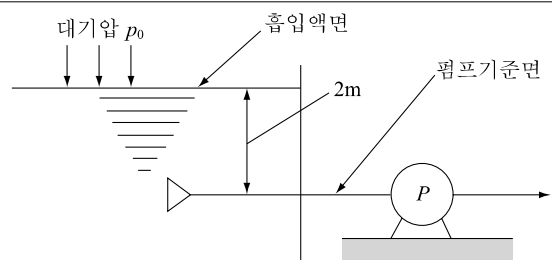
EX 7-15 그림과 같은 펌프의 설치대상에서의 NPSH_{av}를 계산하라. 수온 20℃, 흡입관내 전 손실헤드를 0.8m로 한다. 단, 대기압 $P_a = 10.33 [\text{mH}_2\text{O}]$, 20℃ 포화증기압 $P_{vp} = 0.2383 [\text{mH}_2\text{O}]$, 흡입실양정 $H_s = 3[\text{m}]$, 흡입관내 손실헤드 $h_{fs} = 0.8 \text{ m}$ 이다.



→ → 흡상이기 때문에

$$\begin{aligned} NPSH_{av} &= P_a - P_{vp} - H_s - h_{fs} \\ &= 10.33 - 0.2383 - 3 - 0.8 \\ &= 6.3(\text{m}) \end{aligned}$$

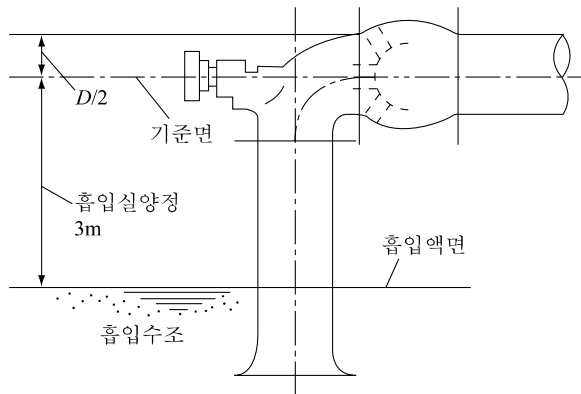
EX 7-16 그림과 같은 펌프의 설치상대에서의 NPSH_{av}를 계산하라. 수온 20℃, 흡입관내 전손실헤드는 0.6m로 한다.



→ → 펌프기준면이 흡입액면보다도 밑에 있기 때문에

$$\begin{aligned} NPSH_{av} &= P_a - P_{vp} + H_s - h_{fs} \\ &= 10.33 - 0.2383 + 2 - 0.6 \\ &= 11.5(\text{m}) \end{aligned}$$

EX 7-17 그림과 같이 보이는 규격 및 설치상태에서의 펌프의 $NPSH_{av}$, $NPSH_{re}$, 캐비테이션에 대하여 검토하라.



펌프규격 : 형식/횡축사류펌프

구경 $D = 1500$ [mm]

전양정 $H = 5$ [m]

토출유량 $Q = 300$ [m^3/min]

회전속도 $n = 175$ [rpm]

출력 $P_s = 370$ [kW]

흡입비속도 $S = 1,300$

비속도 $n_s = 900$ [rpm, m^3/min , m]

설치조건 : 대기압(표고 0 m로 한다) $P_a = 10.33$ [mH_2O]

포화증기압력(수온을 $20^\circ C$ 로 한다) $P_{vp} = 0.32$ [mH_2O]

흡입실양정 $H_s = 3$ [m]

계획토출유량에 있어서의 흡입 손실수두 $h_{fs} = 0.1$ [m]

→ →

$$1. NPSH_{av} = P_a - P_{vp} - H_s - h_{fs} = 10.33 - 0.32 - 3 - 0.1 = 6.91m$$

$$2. NPSH_{re}$$

$$n_s = 900, S = 1,300, H = 5m \text{ 일 때 } \sigma = \left(\frac{n_s}{S} \right)^{\frac{4}{3}} = \left(\frac{900}{1300} \right)^{\frac{4}{3}} = 0.612$$

$$NPSH_{re} = \sigma H = 0.612 \times 5 = 3.06m$$

$$3. NPSH_{av} > 1.3 \times NPSH_{re}$$

$$6.91 > 1.3 \times 3.06 = 3.98: \text{ 캐비테이션 미발생}$$